



Universidad Veracruzana

Facultad de Ciencias Químicas

Región Xalapa

Maestría en Ingeniería Química

Evaluación del desempeño ambiental del cultivo y procesamiento
de la caña de azúcar, cuantificado a través de las huellas de
carbono, hídrica y energética

Tesis para obtener el grado de Maestro en
Ingeniería Química

Presenta:

I.A. Raúl Velásquez de la Cruz

Director:

Dr. Mario Rafael Giraldi Díaz

Asesores:

Dra. María Teresa Leal Ascencio

Dr. Eduardo Castillo González

Febrero de 2024

“Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz”



Universidad Veracruzana

Facultad de Ciencias Químicas
Región Xalapa

Maestría en Ingeniería Química

Evaluación del desempeño ambiental del cultivo y procesamiento de la caña de azúcar, cuantificado a través de las huellas de carbono, hídrica y energética

Tesis para obtener el grado de Maestro en
Ingeniería Química

Presenta:

I.A. Raúl Velásquez de la Cruz

Director:

Dr. Mario Rafael Giraldi Díaz

Dra. María Teresa Leal Ascencio. Asesora

Dr. Eduardo Castillo González. Asesor

Resumen

El estado de Veracruz tiene una gran importancia en la producción nacional de caña de azúcar, contribuyendo con el 40% de la misma. A pesar de su relevancia económica, la industria azucarera en la región presenta impactos ambientales a lo largo de su cadena productiva que no han sido cuantificados. Estos impactos incluyen el uso de fertilizantes, pesticidas y herbicidas, consumo de agua potable, quema de caña, uso del bagazo como combustible, generación de aguas residuales, emisión de gases efecto invernadero, transporte y consumo de múltiples insumos para reparación y mantenimiento de maquinaria. La falta de información detallada ha impedido la evaluación precisa de la huella de carbono, hídrica y energética en cada etapa de la cadena de producción de azúcar. Esta falta de datos dificulta la implementación de estrategias para mejorar la eficiencia ambiental y energética que permita minimizar impactos ambientales a corto, mediano y largo plazo. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño ambiental de la caña de azúcar, utilizando la huella de carbono, hídrica y energética como indicadores a través de la metodología del análisis de ciclo de vida.

En la primera fase, se definieron los objetivos y se delimitó el alcance del análisis a la etapa agrónoma e industrial, lo cual implicó identificar las etapas esenciales y los flujos de entrada y salida que incluyeron, insumos agrícolas, industriales, energéticos e hídricos, así como emisiones generadas por cada actividad dentro de la cadena productiva. Enseguida se creó un inventario, donde se recopiló datos detallados sobre insumos y productos a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida. Organizados en categorías abarcan información sobre el consumo de recursos naturales, emisiones a la atmósfera, agua y suelo, así como los residuos generados.

Posteriormente se realizó la evaluación de impacto donde se obtuvieron los siguientes resultados. En primer lugar, la quema de caña representó el principal contribuyente, abarcando el 43.7% de los impactos totales, seguido por la etapa de clarificación con un 14.9%, y, en tercer lugar, la fertilización con un 9.2%. Este análisis pone de manifiesto que la fase agrónoma desempeña un papel preponderante en las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo con un 54% del total. En cuanto a la huella hídrica, la etapa agrícola volvió a destacarse al consumir el 90.9% del agua utilizada en el sistema en su conjunto, evidenciando que el riego constituye una de las fases de mayor demanda de recursos hídricos. En contraste, en lo que respecta a la huella energética, la etapa industrial resultó el principal contribuyente, representando el 98% del consumo total de energía. Este predominio se atribuye principalmente al área de calderas, que contribuyó con un 46.3%, seguido de la energía no aprovechada con un 23.1%, y finalmente, en la fase de clarificación constituyó un 18.1% del total.

Índice

I.	Introducción	11
II.	Antecedentes.....	13
2.1.	Internacionales	13
2.2.	Nacionales y regionales	17
III.	Hipótesis	19
IV.	Planteamiento del problema	19
V.	Justificación	21
VI.	Objetivos.....	22
6.1.	Objetivo general.....	22
6.2.	Objetivos específicos	22
VII.	Marco teórico.....	23
7.1	Análisis de ciclo de vida	23
7.2.	Descripción de las fases del ACV.....	26
7.2.1.	Definición del objetivo y alcance	26
7.2.2.	Inventario de ciclo de vida (ICV)	26
7.2.3.	Evaluación de impacto.....	27
7.2.4.	Interpretación.....	28
7.3.	Descripción del cultivo y procesamiento de la caña de azúcar.....	29
7.3.1.	Etapa agronómica	30
7.3.2.	Preparación del suelo.....	30
7.3.3.	Labores de siembra.....	31
7.3.4.	Labores de mantenimiento.....	33
7.3.5.	Labores de cosecha.....	35
7.4.	Etapa industrial	37
7.4.1.	Recepción de caña	37
7.4.2.	Molienda.....	39
7.4.3.	Purificación de jugo.....	39
7.4.4.	Evaporación	41
7.4.5.	Cristalización	42
7.4.6.	Centrifugación	43

7.4.7.	Secado.....	43
VIII.	Marco contextual	45
IX.	Metodología.....	47
9.1.	Definición del alcance	48
10.8.1.	Establecimiento del alcance.....	48
10.8.2.	Establecimiento de la unidad funcional	48
10.8.3.	Elección del límite del estudio.....	48
10.8.4.	Calidad de los datos	49
9.2.	Generación del inventario.....	49
9.2.1.	Preparación para recopilación de información	49
9.2.2.	Recolección de datos	50
9.2.3.	Validación de información	51
9.2.4.	Vinculación de datos con procesos y unidad funcional.....	51
9.3.	Determinación de huellas paramétricas	52
9.3.1.	Selección de categorías de impacto	52
9.3.2.	Captura de inventario a software especializado	52
9.3.3.	Obtención de resultados.....	52
9.3.4.	Análisis de sensibilidad	53
9.3.5.	Interpretación de resultados.....	53
X.	Resultados del análisis de ciclo de vida.....	54
10.1.	Definición del objetivo y alcance.....	54
10.2.	Función del sistema del producto.....	54
10.3.	Unidad funcional	54
10.4.	Unidad de referencia	54
10.5.	Alcance.....	54
10.6.	Descripción del proceso	55
10.6.1.	Etapla agrónoma	55
10.6.2.	Etapla industrial	60
10.6.3.	Procesos auxiliares.....	66
10.7.	Inventario de ciclo de vida (ICV).....	69
10.7.1.	Etapla agrónoma	69
10.7.2.	Etapla industrial	74

10.8.	Evaluación de impacto de ciclo de vida	108
10.8.1.	Etapa agrónoma	115
10.8.2.	Etapa industrial	119
10.9.	Descripción global de los impactos totales	133
XII.	Conclusiones.....	137
XIII.	Recomendaciones	139
XIV.	Referencias.....	141

Índice de tablas

Tabla 1.	Métodos de evaluación utilizados en el estudio del ICV	27
Tabla 2.	Listas de las categorías de impacto evaluadas.....	28
Tabla 3.	Resultados del inventario de ciclo de vida (ICV) del subsolado.....	70
Tabla 4.	Resultados del ICV del rastreo	70
Tabla 5.	Resultados del ICV del surcado	71
Tabla 6.	Resultados del ICV de la siembra	71
Tabla 7.	Resultados del ICV de la fertilización.....	72
Tabla 8.	Resultados del ICV del riego.....	72
Tabla 9.	Resultados del ICV para el control de malezas	73
Tabla 10.	Resultados del ICV de quema y corte	74
Tabla 11.	Resultados del ICV de la grúa autosustentable	75
Tabla 12.	Resultados del ICV para el volcador de hilos	75
Tabla 13.	Resultados del ICV para las mesas de alimentación uno y dos.....	76
Tabla 14.	Resultados del ICV para el conductor de caña uno	76
Tabla 15.	Resultados del ICV para el juego de cuchillas uno	77
Tabla 16.	Resultados del ICV para el juego de cuchillas dos	77
Tabla 17.	Resultados del ICV para el conductor de caña dos	78
Tabla 18.	Resultados del ICV para la desfibradora.....	78
Tabla 19.	Resultados del ICV para los servicios en general	79
Tabla 20.	Resultados del ICV para el molino uno.....	80
Tabla 21.	Resultados del ICV para el molino dos	80
Tabla 22.	Resultados del ICV para el molino tres.....	81
Tabla 23.	Resultados del ICV para el molino cuatro.....	82
Tabla 24.	Resultados del ICV para el molino cinco	82
Tabla 25.	Resultados del ICV para el tanque de jugo mezclado	83
Tabla 26.	Resultados del ICV para el sistema de lubricación de los molinos.....	84
Tabla 27.	Resultados del ICV para el sistema de coladores de jugo	84
Tabla 28.	Resultados del ICV para los servicios generales.....	84
Tabla 29.	Resultados del ICV para el conductor de bagazo uno.....	85
Tabla 30.	Resultados del ICV para el conductor de bagazo dos	85

Tabla 31. Resultados del ICV para el secador de bagazo.....	86
Tabla 32. Resultados del ICV para la caldera uno	87
Tabla 33. Resultados del ICV para el intercambiador de calor uno	87
Tabla 34. Resultados del ICV para la chimenea uno.....	88
Tabla 35. Resultados del ICV para el tanque de dosificación	88
Tabla 36. Resultados del ICV para el tanque de condensados puros	89
Tabla 37. Resultados del ICV para el tanque de almacenamiento de agua	89
Tabla 38. Resultados del ICV para el deareador	90
Tabla 39. Resultados del ICV para la caldera dos.....	90
Tabla 40. Resultados del ICV para el intercambiador de calor dos	91
Tabla 41. Resultados del ICV para la chimenea dos	91
Tabla 42. Resultados del ICV para los vehículos.....	92
Tabla 43. Resultados del ICV para el laboratorio	92
Tabla 44. Resultados del ICV de los servicios en general.....	93
Tabla 45. Resultados del ICV de la sulfitación del jugo	93
Tabla 46. Resultados del ICV para el tanque colchón.....	93
Tabla 47. Resultados del ICV para la preparación de hidróxido de calcio	94
Tabla 48. Resultados del ICV para el tanque de alcalización	94
Tabla 49. Resultados del ICV para el calentador primario.....	95
Tabla 50. Resultados del ICV para el calentador secundario	95
Tabla 51. Resultados del ICV para el calentador terciario	95
Tabla 52. Resultados del ICV para la preparación del floculante	96
Tabla 53. Resultados del ICV para la floculación.....	96
Tabla 54. Resultados del ICV para la cámara de clarificación.....	96
Tabla 55. Resultado del ICV del mezclador de lodos	97
Tabla 56. Resultados del ICV para la filtración de lodos.....	97
Tabla 57. Resultados del ICV para los servicios generales en clarificación	97
Tabla 58. Resultados del ICV para el precalentador uno	98
Tabla 59. Resultados del ICV del precalentador dos	98
Tabla 60. Resultados del ICV para el evaporador uno	99
Tabla 61. Resultados del ICV para el evaporador dos	99
Tabla 62. Resultados del ICV para el evaporador tres	100
Tabla 63. Resultados del ICV para el evaporador cuatro	100
Tabla 64. Resultados del ICV para el evaporador cinco	100
Tabla 65. Resultados del ICV para servicios generales.....	101
Tabla 66. Resultados del ICV para los evaporadores 4 - C.....	101
Tabla 67. Resultados del ICV para los evaporadores 5 - C.....	102
Tabla 68. Resultados del ICV para los evaporadores 1 - B.....	102
Tabla 69. Resultados del ICV para los evaporadores 2,3,6 - A.....	103
Tabla 70. Resultados del ICV para los servicios en general	104
Tabla 71. Resultados del ICV para las centrífugas C.....	104
Tabla 72. Resultados del ICV para las centrífugas B	105
Tabla 73. Resultados del ICV para las centrífugas A.....	105

Tabla 74. Resultados del ICV para la bomba sifón	105
Tabla 75. Resultados del ICV los servicios generales.....	106
Tabla 76. Resultados del ICV los servicios generales.....	106
Tabla 77. Resultados del ICV del generador ELIN.....	107
Tabla 78. Resultados del ICV del generador General Electric.....	108
Tabla 79. Resultados del ICV de los servicios generales	108
Tabla 80. Resultados generales por etapa para la producción de 100 gramos de azúcar ...	108
Tabla 81. Resultados completos del ICV de la grúa autosustentable.....	157
Tabla 82. Resultados del ICV completo para el volcador de hilos.....	159
Tabla 83. Resultados del ICV completo para la mesa alimentadora uno	159
Tabla 84. Resultados del ICV completo para la mesa alimentadora dos	160
Tabla 85. Resultados del ICV completo para el conductor de caña uno	160
Tabla 86. Resultados del ICV completo para el juego de cuchillas uno	161
Tabla 87. Resultados del ICV completo para el conductor de caña dos	161
Tabla 88. Resultados del ICV completo para el juego de cuchillas dos.....	162
Tabla 89. Resultados del ICV completo para la desfibradora	162
Tabla 90. Resultados del ICV completo para los servicios generales	163
Tabla 91. Resultados del ICV completo para el molino uno.....	165
Tabla 92. Resultados del ICV completo para el molino dos	166
Tabla 93. Resultados del ICV completo para el molino tres	167
Tabla 94. Resultados del ICV completo para el molino cuatro.....	167
Tabla 95. Resultados del ICV completo para el molino cinco	168
Tabla 96. Resultados del ICV completo para el tanque de jugo mezclado	169
Tabla 97. Resultados del ICV completo para los coladores de jugo	170
Tabla 98. Resultados del ICV completo para los servicios generales en molienda	170
Tabla 99. Resultados completos del ICV para el conductor de bagazo uno	173
Tabla 100. Resultados completos del ICV para el conductor de bagazo dos	173
Tabla 101. Resultados completos del ICV para el secador de bagazo	174
Tabla 102. Resultados completos del ICV para la caldera uno	174
Tabla 103. Resultados completos del ICV para el intercambiador 1	176
Tabla 104. Resultados completos del ICV para la chimenea1	176
Tabla 105. Resultados completos del ICV para el tanque de dosificación.....	177
Tabla 106. Resultados completos del ICV para el tanque de condensados puros.....	177
Tabla 107. Resultados completos del ICV para el tanque de almacenamiento de agua.....	177
Tabla 108. Resultados completos del ICV para el deareador.....	177
Tabla 109. Resultados completos del ICV para la caldera dos	178
Tabla 110. Resultados completos del ICV para el intercambiador 2	180
Tabla 111. Resultados completos del ICV para la chimenea 2	180
Tabla 112. Resultados completos del ICV para los vehículos	181
Tabla 113. Resultados completos del ICV para el laboratorio	181
Tabla 114. Resultados completos del ICV de los servicios en general	181
Tabla 115. Resultados completos del ICV de la sulfitación del jugo.....	183
Tabla 116. Resultados completos del ICV para el tanque colchón	184

Tabla 117. Resultados completos del ICV para la preparación de hidróxido de calcio	184
Tabla 118. Resultados completos del ICV para el tanque de alcalización	184
Tabla 119. Resultados completos del ICV para el calentador primario	184
Tabla 120. Resultados completos del ICV para el calentador secundario.....	184
Tabla 121. Resultados completos del ICV para el calentador terciario.....	185
Tabla 122. Resultados completos del ICV para la preparación del floculante.....	185
Tabla 123. Resultados completos del ICV para la floculación	185
Tabla 124. Resultados completos del ICV para la cámara de clarificación	185
Tabla 125. Resultado completos del ICV del mezclador de lodos	185
Tabla 126. Resultados completos del ICV para la filtración de lodos	186
Tabla 127. Resultados completos del ICV para los servicios generales en clarificación...	186
Tabla 128. Resultados completos del ICV para el precalentador uno.....	186
Tabla 129. Resultados completos del ICV del precalentador dos	187
Tabla 130. Resultados completos del ICV para el evaporador uno.....	187
Tabla 131. Resultados completos del ICV para el evaporador dos	187
Tabla 132. Resultados completos del ICV para el evaporador tres.....	188
Tabla 133. Resultados completos del ICV para el evaporador cuatro.....	188
Tabla 134. Resultados completos del ICV para el evaporador cinco	188
Tabla 135. Resultados completos del ICV para servicios generales	189
Tabla 136. Resultados completos del ICV del generador ELIN	189
Tabla 137. Resultados completos del ICV del generador General Electric	189
Tabla 138. Resultados completos del ICV de los servicios generales en planta de fuerza	189
Tabla 139. Resultados completos del ICV para los evaporadores 4 - C	190
Tabla 140. Resultados completos del ICV para los evaporadores 5 - C	191
Tabla 141. Resultados completos del ICV para los evaporadores 1 - B	191
Tabla 142. Resultados completos del ICV para los servicios en general	191
Tabla 143. Resultados completos del ICV para los servicios en general	192
Tabla 144. Resultados completos del ICV para las centrífugas C.....	193
Tabla 145. Resultados completos del ICV para las centrífugas B.....	194
Tabla 146. Resultados completos del ICV para las centrífugas A	194
Tabla 147. Resultados completos del ICV los servicios generales	195
Tabla 148. Resultados completos del ICV para el elevador de azúcar.....	196
Tabla 149. Resultados completos del ICV del sinfín	197
Tabla 150. Resultados completos del ICV del secador	197
Tabla 151. Resultados completos del ICV del elevador de azúcar seca.....	197
Tabla 152. Resultados completos del ICV de la zaranda	197
Tabla 153. Resultados completos del ICV de la báscula.....	198
Tabla 154. Resultados completos del ICV de la cosedora	198
Tabla 155. Resultados completos del ICV de los servicios en secado y empacado.....	198
Tabla 156. Caracterización del bagazo de caña, base seca.....	269
Tabla 157. Masa molar y densidad de los productos de combustión del bagazo	273
Tabla 158. Coeficientes de entalpía de los gases de combustión	275

Índice de figuras

Figura 1. Etapas de un análisis de ciclo de vida	25
Figura 2. Sistema de producción agrícola de la caña de azúcar	30
Figura 3. Zona de influencia de los cultivos de caña.....	45
Figura 4. Zona ocupada por el Ingenio Mahuixtlán	46
Figura 5. Diagrama de la metodología aplicada en este estudio.	47
Figura 6. Nivel de calidad de datos para el ACV de la producción de azúcar.	49
Figura 7. Procedimiento para la generación del inventario de ciclo de vida.....	50
Figura 8. Diagrama de flujo que conforman la preparación del terreno.....	56
Figura 9. Diagrama de flujo de actividades intermedias durante el cultivo de caña de azúcar	58
Figura 10. Diagrama de flujo de las últimas actividades de la cosecha de la caña	59
Figura 11. Flujos y equipos que conforman la etapa de recepción de materia prima.	60
Figura 12. Flujos y equipos que conforman la etapa de molienda.	61
Figura 13. Flujos y equipos que conforman la etapa de clarificación y filtración.	63
Figura 14. Flujos y equipos que conforman la etapa de evaporación.....	64
Figura 15. Flujos y equipos que conforman la etapa de cristalización y centrifugado.....	65
Figura 16. Flujos y equipos que conforman la etapa de secado	66
Figura 17. Flujos y equipos que conforman las calderas.....	67
Figura 18. Flujos y equipos que conforman la torre de enfriamiento.....	68
Figura 19. Flujos y equipos que conforman la planta de fuerza.....	69
Figura 20. Diagrama de los resultados por etapa y subetapa de la huella de carbono	110
Figura 21. Diagrama de los resultados por etapa y subetapa de la huella hídrica	111
Figura 22. Diagrama de los resultados por etapa y subetapa de la huella energética.....	112
Figura 23. Resultados de la huella de carbono (izquierda), huella energética (centro) y huella hídrica (derecha) de diversos investigadores.	113
Figura 24. Distribución del consumo energético primario en la cadena de producto	114
Figura 25. Resultados de la huella de carbono por etapa (izquierda) y por operaciones (derecha)	116
Figura 26. Resultados de la huella de hídrica por etapa (izquierda) y por operaciones (derecha)	117
Figura 27. Resultados de la huella de energética por etapa (izquierda) y por operaciones (derecha)	118
Figura 28. Resultados de la huella de carbono por etapa industrial	120
Figura 29. Resultado del diagrama de flujo de la etapa de clarificación.....	121
Figura 30. Resultado del diagrama de flujo de la recepción de materia prima	122
Figura 31. Resultado del diagrama de flujos para la molienda	122
Figura 32. Resultados de la huella de hídrica por etapa industrial	123
Figura 33. Resultado del diagrama de flujo para la recepción de la materia prima	124
Figura 34. Resultados de la huella de energética por etapa industrial.....	125
Figura 35. Resultados del diagrama de las pérdidas de energía	126
Figura 36. Resultados del diagrama de calderas.....	126

Figura 37. Emisiones atmosféricas por subproductos	127
Figura 38. Consumo de agua por subproducto	128
Figura 39. Consumo de energía por subproducto	128
Figura 40. Comparación de los impactos totales del sistema con y sin generación de energía eléctrica.....	129
Figura 41. Variación de la huella de carbono respecto a otros combustibles.....	131
Figura 42. Variación de la huella de carbono respecto al contenido de humedad del bagazo	133
Figura 43. Participación del sector azucarero en las emisiones generadas en México	134
Figura 44. Emisión anual de gases efecto invernadero de alimentos de consumo básico..	134
Figura 45. Consumo anual de agua de diversos alimentos de consumo básico.	135
Figura 46. Comparación del consumo por tipo de fuente utilizada para la generación de energía en el sistema nacional (arriba) y el caso de estudio (abajo).....	136
Figura 47. Flujos de entrada y salida en la operación de subsolado.....	199
Figura 48. Flujos de entrada y salida en la operación de rastreo.....	200
Figura 49. Flujos de entrada y salida durante el surcado del terreno	202
Figura 50. Flujos de entrada y salida durante la siembra	204
Figura 51. Flujos de entrada y salida durante el riego.....	205
Figura 52. Flujos de entrada y salida durante la fertilización.....	206
Figura 53. Flujos de entrada y salida durante el control de malezas	208
Figura 54. Flujos de entrada y salida durante la quema y corte	210
Figura 55. Flujos de entrada y salida durante el transporte de caña.....	211
Figura 56. Flujos de entrada y salida durante la operación de la grúa	212
Figura 57. Flujos de entrada y salida durante la operación del volcador de hilos.....	215
Figura 58. Flujos de entrada y salida de la mesa de alimentación 1.....	218
Figura 59. Flujos de entrada y salida de la mesa de alimentación 2.....	221
Figura 60. Flujos de entrada y salidas del conductor de alimentación 1	224
Figura 61. Flujos de entrada y salida del juego de cuchillas 1	225
Figura 62. Flujos de entrada y salida del conductor de caña 2	228
Figura 63. Flujos de entrada y salida del juego de cuchillas 2	229
Figura 64. Flujos de entrada y salida de la desfibradora	231
Figura 65. Flujos de entrada y salida de los servicios generales de la recepción.....	234
Figura 66. Flujos de entrada y salida que participan en el molino 1	237
Figura 67. Flujos de entrada y salida del molino 2.....	240
Figura 68. Flujos de entrada y salida del molino 3.....	244
Figura 69. Flujos de entrada y salida del molino 4.....	247
Figura 70. Flujos de entrada y salida del molino 5.....	251
Figura 71. Flujos de entrada y salida del tanque de jugo mezclado	254
Figura 72. Flujos de entrada y salida en los coladores	256
Figura 73. Flujos de entrada y salida de los servicios en general en molienda.....	258
Figura 74. Flujos de entrada y salida del conductor de bagazo 1	260
Figura 75. Flujos de entrada y salida del conductor 2 de bagazo	262
Figura 76. Flujos de entrada y salida del secador de bagazo.....	264

Figura 77. Flujos de entrada y salida de la caldera 1	267
Figura 78. Flujos de entrada y salida del intercambiador 1	281
Figura 79. Flujos de entrada y salida de la chimenea 1	284
Figura 80. Flujos de entrada y salida del tanque de dosificación	287
Figura 81. Flujos de entrada y salida del tanque de condensados	289
Figura 82. Flujos de entrada y salida del tanque de almacenamiento de agua	289
Figura 83. Flujos de entrada y salida del deareador	291
Figura 84. Flujos de entrada y salida durante el servicio a vehículos	293
Figura 85. Flujos de entrada y salida en el laboratorio.....	294
Figura 86. Flujos de entrada y salida de los servicios generales en calderas	295
Figura 87. Flujos de entrada y salida de la sulfitación	298
Figura 88. Flujos de entrada y salida del tanque colchón.....	299
Figura 89. Flujos de entrada y salida del tanque de hidróxido de calcio.....	299
Figura 90. Flujos de entrada y salida del tanque de alcalización	300
Figura 91. Flujos de entrada y salida del calentador primario.....	301
Figura 92. Flujos de entrada y salida del calentador secundario.....	302
Figura 93. Flujos de entrada y salida del calentador final	303
Figura 94. Flujos de entrada y salida del tanque para floculador	303
Figura 95. Flujos de entrada y salida de la floculación	304
Figura 96. Flujos de entrada y salida de la cámara de clarificación	305
Figura 97. Flujos de entrada y salida del mezclador	306
Figura 98. Flujos de entrada y salida del filtro	307
Figura 99. Flujos de entrada de los servicios generales en clarificación.....	309
Figura 100. Flujos de entrada y salida del precalentador 1	309
Figura 101. Flujos de entrada y salida del precalentador 2	311
Figura 102. Flujos de entrada y salida del evaporador 1	312
Figura 103. Flujos de entrada y salida del evaporador 2	314
Figura 104. Flujos de entrada y salida del evaporador 3	315
Figura 105. Flujos de entrada y salida del evaporador 4.....	317
Figura 106. Flujos de entrada y salida del evaporador 5	318
Figura 107. Flujos de entrada de los servicios generales en evaporación	320
Figura 108. Flujos de entrada y salida del generador 1	321
Figura 109. Flujos de entrada y salida del generador 2	322
Figura 110. Flujos de entrada y salida de la planta de fuerza.....	323
Figura 111. Flujos de entrada y salida del evaporador 4C	325
Figura 112. Flujos de entrada y salida del evaporador 5C	327
Figura 113. Flujos de entrada y salida del evaporador 1B	328
Figura 114. Flujos de entrada y salida de los evaporadores 2,3,6 A	330
Figura 115. Flujos de entrada y salida de los servicios generales durante la cristalización.....	331
Figura 116. Flujos de entrada y salida de centrífugas C.....	333
Figura 117. Flujos de entrada y salida de centrífugas B.....	336
Figura 118. Flujos de entrada y salida de centrífugas A	337
Figura 119. Flujos de entrada y salida de los servicios generales en centrifugación	339

Figura 120. Flujos de entrada y salida del elevador	341
Figura 121. Flujos de entrada y salida del secador.....	342
Figura 122. Flujos de entrada y salida del elevador 2	344
Figura 123. Flujos de entrada y salida de la zaranda.....	344
Figura 124. Flujos de entrada y salida de la báscula	345
Figura 125. Flujos de entrada y salida de la cosedora.....	346
Figura 126. Flujos de entrada y salida de los servicios generales de secado y empacado .	347

I. Introducción

La agroindustria de la caña de azúcar en México es una fuente económica principal, ya que genera un valor entre 40 y 50 mil millones de pesos. Se cultivan más de 800 mil hectáreas de caña de azúcar en 267 municipios de 15 Entidades Federativas y 170 mil productores, así como 49 ingenios. La importancia de la caña radica en que es una materia prima para la industria azucarera, de la cual se consumen 36.7 kg per cápita promedio al año. Debido a ello, México es el sexto productor a nivel mundial con 56.6 millones de toneladas de azúcar producidas al año (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020; Secretaría de Agricultura y Desarrollo Sostenible, 2021).

El mismo desarrollo económico basado en la producción de azúcar a gran escala, se vincula a prácticas poco convenientes como la aplicación excesiva de fertilizantes, la quema del cultivo y descargas de aguas residuales que generan daños al ambiente, debido a la estrecha relación que existe entre el crecimiento poblacional e industrial con el deterioro ambiental. Dicha situación ha implicado en enfrentar el reto de convertir economías industrializadas en sistemas industriales sustentables (Espinosa, 2009).

En virtud de la importancia de la caña de azúcar a nivel nacional, se ha avanzado en conocer y analizar los impactos ecológicos que se generan por su cultivo y procesamiento provocados por el consumo de agua, fabricación y transporte de productos químicos, así como el consumo de combustibles fósiles y vegetales. Sin embargo, se enfrenta a escasa información que existe respecto a los daños cuantitativos generados por esta actividad económica, debido a la falta de identificación de los factores que contribuyen a los problemas ambientales.

En este sentido, la creación de inventarios ambientales a través de los análisis de ciclo de vida permite identificar y valorar los efectos negativos o positivos de impactos; crear medidas preventivas, correctoras y compensatorias, así como programas de vigilancia ambiental durante en el cultivo y procesamiento de la caña de azúcar.

El objetivo de este trabajo consistió en evaluar el desempeño ambiental por las actividades de cultivo y procesamiento de la caña de azúcar mediante la cuantificación de las huellas de carbono, hídrica y energética, generadas por la emisión de gases efecto invernadero, consumo de agua y abastecimiento de energía, con el fin de establecer los potenciales impactos ambientales derivada de esta actividad económica.

II. Antecedentes

Para el análisis de los antecedentes se presentan en primer lugar trabajos de carácter internacional. En segundo lugar, se muestran aquellos que fueron publicados a nivel nacional, y en tercer lugar aquellos reportados cercanos a la zona de estudio o de carácter regional. Para todos ellos se focalizó en los análisis de ciclo de vida o trabajos relacionados con los impactos ambientales generados por la producción de caña y azúcar.

2.1. Internacionales

El análisis de ciclo de vida (ACV) es un proceso para evaluar de manera objetiva, las cargas ambientales asociadas a un servicio, producto o actividad, mediante la identificación y cuantificación del uso de materia y energía, así como los coproductos y productos generados con el fin de determinar el impacto que genera el uso de los recursos y las emisiones al medio ambiente, de esta manera, para evaluar y llevar a cabo prácticas de mejora del ambiente.

Dicho proceso se ha puesto en práctica por autores como Ramjeawon (2004) quien evaluó el ciclo de vida de la caña de azúcar en la isla de Mauricio, eligió unidad funcional una tonelada de azúcar exportado de la isla. En su trabajo incluye la etapa de cultivo, quema, cosecha, transporte de insumos, fertilizantes y fabricación de herbicidas y generación de electricidad del bagazo. Recopiló datos de empresas, fábricas, estadísticas de azúcar, bases de datos y literatura. Encontró que se requieren 553 m³ de agua para la producción de una tonelada de azúcar, 1995 MJ de energía aportada por combustibles fósiles, y 160 kg de CO₂ emitido a la atmósfera. Como resultados específicos, encontró que el cultivo de caña y la cosecha dan cuenta del mayor impacto ambiental (44%), seguido de fertilizantes y fabricación de herbicidas (22%), procesamiento de azúcar y electricidad generación (20%), transporte (13%) y quema de caña (1%). La etapa agrícola (cultivo y cosecha de caña, y fabricación de fertilizantes y herbicidas) representa dos tercios del impacto ambiental de la producción de azúcar.

Renouf y Wegener (2007), realizaron el análisis de ciclo de vida de la producción y procesamiento de caña de azúcar en Queensland, Australia. Esta incluyó todos los procesos de preparación del terreno, plantación, cosecha y procesamiento hasta la obtención de azúcar.

Dentro de cada actividad, se contempló la adquisición de fertilizantes, pesticidas, consumo energético y transporte en ambas etapas. Se consideraron los bienes de capital de la fase agrícola, mientras que los bienes de capital de la etapa industrial no se tomaron en cuenta debido a que el rendimiento y larga vida útil de los ingenios hacen que los impactos por su uso sean inapreciables. Consideraron diferencias en las prácticas de cultivo de caña, ya que las variaciones en las labores de producción tienen una influencia considerable en los resultados. Para evaluar dicha diferencia, los cultivos de caña se evaluaron en distintos escenarios. Además de un sistema de cultivo promedio de dos regiones productoras de caña con prácticas de cultivo diferentes. Entre sus resultados reportaron que el consumo promedio de energía se vinculó en 41% para riego, 26% para producción de fertilizantes, 22% por el consumo directo de combustible en campo y de 5% a 10% por los bienes de capital. La variación principal en la entrada de energía total entre los tres escenarios se debe a las distintas técnicas de riego utilizadas. Por otra parte, afirmaron que, en comparación con otros productores de azúcar, la caña de azúcar tiene ventajas en relación con el agotamiento de los combustibles fósiles no renovables y la emisión de gases de efecto invernadero, debido a la disponibilidad de excedentes de bagazo, que pueden utilizarse como combustible renovable para desplazar combustibles fósiles. Además, que la caña de azúcar también requiere menos tierra que otros cultivos para producir la misma cantidad de sacárido recuperable.

Chandra *et al.*, (2018) realizaron el análisis de ciclo de vida del proceso de cultivo de caña de azúcar en las islas Fiji, los resultados de la evaluación de impacto se generaron usando la metodología *CML, Receta e Impact 2002*, modelos que se ejecutan en *Open LCA* software utilizando la base de datos *Ecoinvent*. Esto conectó los flujos de sistema y flujos de proceso a los sistemas de productos para calcular los resultados de la evaluación del impacto del ciclo de vida basados en datos locales para comparar y precisar la evaluación. Análisis previos revelaron que la producción de caña de azúcar tiene un impacto considerable en el calentamiento global potencial debido al uso significativo de combustibles fósiles en maquinaria agrícola y transporte, y la producción y uso de agroquímicos. Los resultados de este estudio mostraron que la producción de caña de azúcar tiene el menor impacto en el

agotamiento de la capa de ozono. Se encontró que la producción y el uso de fertilizantes fueron uno de los temas clave que afectan a varias categorías de impacto.

Gunawan *et al.*, (2019) evaluaron el ciclo de vida de la caña de azúcar en el azúcar para calcular el uso de energía y emisiones de gases efecto invernadero (GEI) para una tonelada de azúcar producida. En este estudio, los límites del sistema incluyeron el cultivo de caña de azúcar, molienda y conversión en azúcar. La etapa del cultivo incluyó fuentes de emisiones de GEI derivadas del suministro de semillas, el combustible utilizado para maquinaria, transporte, producción de fertilizantes y pesticidas. En la fase industrial incluyeron la molienda y conversión de azúcar, incluidas las emisiones por generación de electricidad, el uso de combustibles y productos químicos.

Identificaron el consumo de energía en el ciclo de vida de la caña de azúcar con 116,562.52 MJ/tonelada de azúcar donde el mayor consumo lo tuvo el carbón con 87%. El procesamiento de azúcar aportó la mayor emisión de GEI del 96,4% (10.728 ton CO₂/ton de azúcar) con el uso de combustibles fósiles alcanzando 9.344 ton CO₂/ton de azúcar (87%) y durante el cultivo de la caña de azúcar, la fabricación de fertilizantes aportó el mayor impacto ambiental con 0,29 ton CO₂/ton de azúcar 73,48%, la fabricación de pesticidas 22,5% y la mecanización 4%. La reducción de emisiones de bagazo que reemplaza los combustibles fósiles en la producción de azúcar fue de 2.43 ton CO₂-eq/ton de azúcar, alcanzando 25% de las emisiones totales de CO₂/tonelada de azúcar. Concluyeron que algunas opciones para el mejoramiento del desempeño ambiental son uso óptimo de fertilizantes y pesticidas, implementación de proyecto de cogeneración y el mejoramiento de la caña de azúcar.

Hiloidhari *et al.*, (2021) analizaron el cultivo de caña en cuatro temporadas. Se estudiaron cuatro tipos de calderas de cogeneración; baja presión, media presión, alta presión y muy alta presión. Ante ello, se plantearon estudiar cinco combinaciones las cuales fueron ALP (*Adsali low pressure*), RLP (*ratoon low pressure*), PLP (*preseasonal low pressure*), SLP (*Suru low pressure*) y MLP (*Mixed sugarcane low pressure*). El objetivo fue estudiar un sistema de la cuna a la puerta para la producción de una tonelada de azúcar. Los límites del sistema

consistieron en el cultivo de la caña y el ingenio azucarero. Se tomaron en cuenta el suministro de energía, agua, productos químicos y diésel para la etapa agrónoma. Se consideró el traslado de la caña hacia la fábrica y dentro de esta se tomaron en cuenta el uso de energía, agua y productos químicos. Así como la cogeneración de energía eléctrica y calor para consumo de los equipos dentro del ingenio. Se realizaron asignaciones de carga basados en el poder calorífico inferior del azúcar, melaza y bagazo y fueron tomados como 16.50 MJ/kg, 10.00 MJ/kg y 7.40 MJ/kg respectivamente. Se consideró que restos de caña de azúcar generados en el cultivo de caña, se retornaron al suelo como nutrientes orgánicos; alrededor de 100 kg de residuos se generaron por cada tonelada de caña de azúcar producidas y que la aplicación de 8 a 10 toneladas de residuos, proporcionan de 30 a 50 kg de nitrógeno, de 13 a 30 kg de fósforo y de 53 a 100 kg de potasio. También se consideró que, por cada tonelada de caña procesada, se obtuvieron 30 kg de lodos y que se retornaron al suelo como nutrientes. También mencionó que la combustión de una tonelada de bagazo produce alrededor de 15 kg de cenizas. Los métodos de cálculo utilizados fueron el *ReCiPe* y *Cumulative Energy Demand*. Como resultados se mencionó que 31% de la energía consumida provino de la molienda, 23% de la preparación de la caña, 15% de centrífugas, 6% de bombas de agua, 6% de torres de enfriamiento, 5% de clarificación, 4% de calderas, 3% de iluminación, 3% de almacén de azúcar, 2% de cristalizadores, 1% de la planta de tratamiento de efluentes y 1% de evaporadores. Se reportó una emisión 324 a 834 kg CO₂ eq / ton azúcar producida, de los cuales, 93% proviene del cultivo y 7% de la fábrica.

Se mencionó que debido a algunos manejos de reintegración de nutrientes se evitó la emisión de 22 a 48 kg CO₂ eq / ton azúcar en la etapa agrónoma y 2.4 a 5.4 kg en la etapa industrial debido a la generación de energía eléctrica para uso interno. Por otra parte, el consumo de agua se consumió en un rango de 218 a 277 m³ / ton de caña producida y como principal contribuyente con 99% el agua de riego suministrada. Respecto al consumo de energía, se reportó consumos de 3.1 a 7.9 MJ/kg de azúcar de los cuales, 82% de ellos proviene de fuentes directas de combustibles fósiles por su consumo durante la generación de electricidad, consumo directo como combustible para maquinaria y de fuentes indirectas por el uso de fertilizantes y otros productos químicos. El resto de contribución provino de

fuentes de energías renovables. Este autor remarca ciertas limitaciones en su trabajo, puesto que menciona que la generación de energía depende de la variedad de caña, la calidad del bagazo, la eficiencia de las calderas y turbinas. Así como la adquisición de algunos parámetros de producción fueron tomados de bases de datos y resalta que la demanda de agua y fertilizantes varía anualmente, así como las precipitaciones de agua.

2.2. Nacionales y regionales

Aguilar-Rivera y Fernández-Juárez (2021) realizaron una evaluación de la capacidad y estrategias de reconversión de la agroindustria azucarera en Veracruz. En ella se plantean el estado económico, productivo, social de la producción de azúcar en México. Analizaron indicadores como el rendimiento de producción (tonelada/hectárea), superficie cosechada (hectáreas), sacarosa en caña, fibra en caña, vehículos de acarreo, caña cosechada mecánicamente y el precio neto de la caña, mientras en la etapa industrial se estudiaron la caña molida, las pérdidas de sacarosa, la eficiencia de fábrica, tiempos perdidos de operación, producción de cachaza, bagazo, energía eléctrica, producción de vapor y la quema de bagazo. Entre todo, se demostró que 40% de los ingenios azucareros en Veracruz se encuentran por encima de indicadores de productividad por encima de la media nacional. Se encontró que 13% de los agricultores utilizan riego artificial y 84% régimen de temporal el cuál repercute en 12% menor productividad respecto al potencial de producción a pesar de que los suelos tengan actitudes edafoclimáticas para el cultivo de caña.

En trabajos enfocados al análisis de ciclo de vida, se encuentra la revisión hecha por Aguilar-Rivera y Espinosa-López (2014) respecto a los puntos de control y las etapas del proceso críticas durante la producción de azúcar, incluyendo el cultivo de caña, la producción de azúcar y energía eléctrica a partir del bagazo, con el fin de disminuir emisiones y establecer alternativas de producción. Entre los autores de relevancia que se citan se encuentran Renouf y Wegener (2007) á, quienes presentan las posibles sinergias de los subproductos del procesamiento de la caña, los cuáles se proponen como el uso de cachazas y vinazas para la cogeneración de electricidad. Las vinazas a su vez se generan por la fermentación y destilación de melaza que al mismo tiempo producen etanol, un combustible

apreciado por las bajas emisiones que genera respecto a la gasolina. El uso de cenizas como fertilizante agrícola y el bagazo para la producción de energía eléctrica. De la misma manera, Chohfi *et al.*, (2004) reportaron una emisión total de 111,449.2 kg CO₂/ha-ciclo de vida, y también consideraron la captura de carbono durante la etapa agrónoma restando 145,290.5 kg CO₂/ha-ciclo de vida, teniendo una contribución a la captura de carbono para el ciclo completo del cultivo y procesamiento de la caña de azúcar.

Meza-Palacios *et al.*, (2019) evaluaron la contribución ambiental a la salud humana, el cambio climático, la calidad de los ecosistemas y los recursos en México a partir de la caña de azúcar. Consideraron los límites del sistema al cultivo y la cosecha de caña de azúcar, transporte de caña al ingenio azucarero y cogeneración de electricidad a partir del bagazo. Las emisiones asociadas se tomaron de la base de datos *SimaPro-Ecoinvent*, la Mesa Redonda sobre Biocombustibles (RSB) y la Estación de Investigación *Agroscope Reckenholz-T€anikon* (ART). La evaluación de impacto del ciclo de vida (LCIA) se llevó a cabo por el software *SimaPro* 8.3.0 y el método de caracterización utilizado fue *IMPACT 2002p*. Los resultados mostraron que la etapa de cultivo y cosecha de la caña de azúcar proporciona los impactos ambientales más elevados (52%) seguidos de la cogeneración eléctrica (25,7%), el transporte de la caña de azúcar (12,1%) y, finalmente, el procesado en el ingenio azucarero (10,2%). Concluyeron que el ACV en la producción de azúcar de caña puede apoyar el proceso de toma de decisiones para hacer frente a este problema ambiental.

III. Hipótesis

Se espera que, en el análisis de ciclo de vida del ingenio azucarero, la etapa industrial sea el mayor contribuyente a la huella de carbono y energética, mientras que la etapa agrícola predomine como el principal factor en la huella hídrica.

IV. Planteamiento del problema

La caña de azúcar tiene una gran importancia en el estado de Veracruz, ya que genera el 40% de la producción nacional. Sin embargo, esta industria provoca impactos ambientales a lo largo de la cadena productiva que no han sido cuantificados. Entre las 18 fábricas que se encuentran operando en el estado, el Ingenio de Mahuixtlán tiene una participación en la producción de azúcar del 2% (CONADESUCA/SADER, 2024) y entre las actividades que generan impactos se encuentran en la fabricación, transporte y uso de fertilizantes, pesticidas, herbicidas; el consumo de agua potable para riego en campo y suministro en calderas; la quema de la caña antes del corte y el uso del bagazo como combustible; el consumo de diésel, gasolina, energía eléctrica, grasas, aceites, azufre y otros insumos.

A pesar de ello, se cuenta con poca información de la magnitud de los impactos ambientales de todas las operaciones que conllevan la producción y procesamiento de la caña. Esto ha impedido que se conozcan las emisiones de carbono, el consumo de agua y el consumo energético, y, en consecuencia, la huella de carbono, hídrica y energética de cada operación que conforma la cadena de producción de azúcar, impidiendo que se focalicen esfuerzos en los puntos críticos contaminantes a corto plazo. A mediano y largo plazo, no se podrían implementar estrategias que permitan generar sinergias entre los principales subproductos o residuos, impidiendo así crear cadenas de suministro inversas con los residuos de bagazo, cachaza y melaza o bien, mejorar los ya existentes, evitando el aumentando de la eficiencia del sistema en general.

Debido a que no existe información para medir los impactos ambientales, se desconoce de manera minuciosa, los flujos de materia y energía que participan durante la producción de caña y su transformación en azúcar. Sin inventarios ambientales, no es posible identificar y cuantificar los recursos materiales y energéticos que son abastecidos, ni las emisiones al aire,

agua, suelo, generación de residuos, las cuales, en su conjunto, son necesarios para conocer los potenciales impactos ambientales. Por lo anterior, este trabajo tuvo el objetivo de evaluar el desempeño ambiental del cultivo y procesamiento de la caña de azúcar cuantificado a través de la huella de carbono, hídrica y energética.

V. Justificación

Al finalizar el análisis de ciclo de vida del cultivo y procesamiento de caña de azúcar, la empresa tendrá acceso a la identificación de los flujos de materiales y recursos energéticos que proceden o se destinan a la naturaleza, así como los flujos que tienen origen o destino en la tecnosfera, tanto de los subprocesos de la etapa agronómica, como los que conforman la etapa industrial, y que son importantes para el análisis del desempeño ambiental del sistema productivo.

Ligado a lo anterior, se tendrán beneficios técnicos al contar con un diagnóstico en el que se cuantifiquen los impactos ambientales generados a lo largo de la cadena de procesamiento de la caña de azúcar, lo cual constituirá un instrumento para la toma de decisiones que permitirá focalizarse en las áreas ambientales críticas del proceso.

Los beneficios ambientales se relacionan con obtención de la magnitud de las huellas paramétricas, ya que, al ser indicadores del impacto ambiental, servirán para proponer estrategias que mejoren la cadena de valor con un menor impacto para el ambiente y aprovechando los recursos que se tienen.

Adicionalmente, con la identificación de los procesos de mayor impacto, se podrán tomar medidas para reducir el consumo de materias primas que permitirán reducir el gasto económico de la empresa, así como la detección de los elementos que mejoren la marca a través del producto.

Indirectamente se obtendrían beneficios legales y sociales al demostrar que la empresa cumple con lineamientos ambientales por lo que podrá mejorar y ampliar relaciones con actuales y nuevos clientes.

VI. Objetivos

6.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño ambiental del cultivo y procesamiento de la caña de azúcar mediante la cuantificación de las emisiones de gases efecto invernadero, consumo de agua y abastecimiento energético, para la determinación de las huellas de carbono, hídrica y energética.

6.2. Objetivos específicos

- Definir el alcance del análisis de ciclo de vida del sistema conforme a lo establecido en las normas ISO 14040 e ISO 14044 para establecer los límites del estudio.
- Generar el inventario de ciclo de vida a través del rastreo y cuantificación de los flujos de materiales y energía que participan en el sistema del producto mediante entrevistas a productores locales de caña.
- Cuantificar las huellas paramétricas de carbono, hídrica y energética mediante el procedimiento de evaluación de impacto del análisis de ciclo de vida, para la evaluación de los impactos ambientales.

VII. Marco teórico

En este trabajo se usó como base metodológica las normas ISO 14040 e ISO 14044. ISO (*International Organization for Standardization*) es una organización no gubernamental que se compone por expertos en normalización para desarrollar estándares internacionales, basados en materias relevantes para el mercado con respaldo en la innovación que busca brindar solución a problemas globales. Las normas de la familia ISO 14000 proporciona los lineamientos para la gestión de las responsabilidades ambientales. Entre ellas las 14040/44 que menciona los principios y generalidades sobre el ACV.

En México, existen normas de carácter no obligatorio que son adaptaciones de las normas internacionales, entre ellas se tienen la NMX-SAA-14001-IMNC-2015 que describe los requisitos para el uso de sistemas de gestión ambiental y la NMX-SAA-IMNC-2008 y NMX-SAA-14044-IMNC-2008 que establecen las referencias, así como directrices para la realización de un ACV, respectivamente.

7.1 Análisis de ciclo de vida

El ACV es una herramienta utilizada para conocer las cargas ambientales de sistemas, procesos o productos, así como las diferentes etapas de su ciclo de vida en relación con una función particular. Brinda una sólida base para que las organizaciones tomen decisiones técnicas apropiadas en cuanto a la incorporación de un nuevo producto o la modificación de una línea de producción. Además, es útil para atender responsabilidades legales, sociales y políticas, disminución de costos, pérdidas económicas y de imagen (Jolliet *et al.*, 2010; Massolo y Castagnasso, 2015). Esta definición aplicada a un producto hace referencia a la extracción de materias primas, energía requerida, su conversión en procesos de manufactura, transporte y uso, hasta su posterior disposición final ya sea reciclaje, reúso o desecho (PNUMA, 2004).

El ACV inició en 1960 por la preocupación sobre el uso, suministro y cuantificación de materias primas y recursos energéticos. A partir de ello, surgieron trabajos como el presentado por Harold Smith en la Conferencia Mundial de Energía de 1963 donde publicó los cálculos de los requisitos de energía para la producción de productos químicos. Otro

trabajo fue hecho en 1969 por *The Coca-Cola Company*, donde realizó la comparación de dos tipos de botellas y cuál de ellas generaba la menor cantidad de contaminantes. Subsecuentemente se publicaron otros estudios entre 1970 y 1991 pero se presentaban usos indebidos enfocados en mercadotecnia y como medida para evitar dichas prácticas, surge una norma por parte de la Organización Internacional de Estandarización (ISO), con serie 14000.

Ya en 2002, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) se unió a la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química (SETAC) para emitir la iniciativa de ACV como asociación internacional donde dieron a conocer un programa para divulgar el pensamiento de ciclo de vida, y utilizar datos e indicadores para mejorar la metodología creada por la ISO. De esta manera, ha evolucionado el análisis de ciclo de vida y sus aplicaciones (SAIC, 2006), de tal manera que está conformado por cuatro fases interconectadas e iterativas (Roiz, 2010) como se muestra en la Figura 1:

Definición del objetivo y el alcance: es la etapa preliminar esencial que va a permitir identificar el perímetro base necesario para la cuantificación de los impactos ambientales.

Análisis del inventario: consiste en la recolección de información necesaria para la realización del inventario de consumos de recursos y emisiones al ambiente. Esta etapa es un proceso complejo y detallado.

Evaluación de impacto: Aquí consiste en convertir los consumos de recursos y emisiones en indicadores de impacto ambiental. Existen varios métodos de evaluación que serán elegidos según el objetivo planteado.

Interpretación: consiste en analizar los impactos ambientales obtenidos en la etapa anterior con la finalidad de obtener conclusiones, explicar limitaciones y hacer recomendaciones coherentes con los objetivos y el campo de estudio.

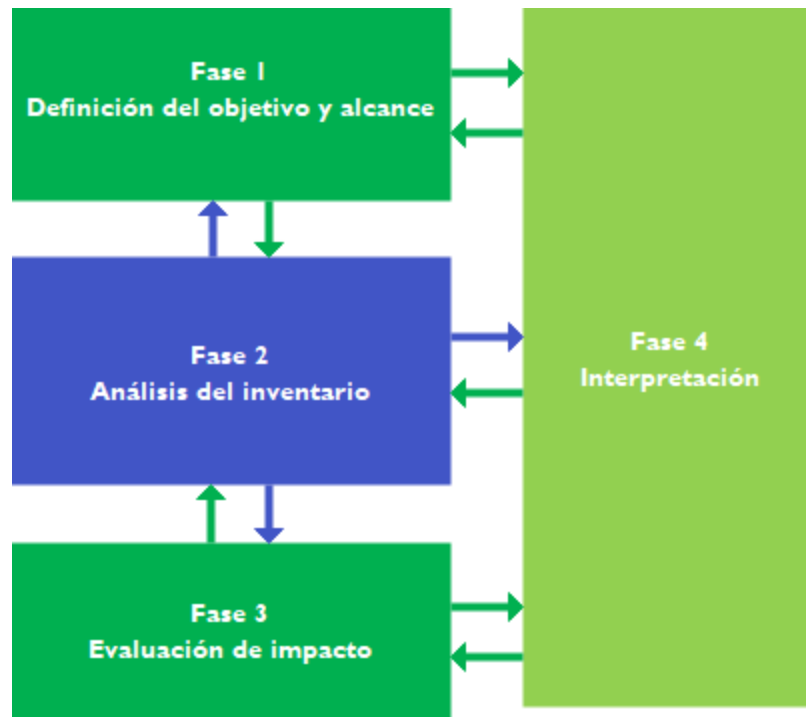


Figura 1. Etapas de un análisis de ciclo de vida
Fuente: Elaboración propia adaptado de (ISO 14040, 2006)

Los alcances que tiene el ACV sirven para asegurar que la amplitud y profundidad del estudio sean compatibles y suficientes para alcanzar el objetivo establecido, y se divide de la siguiente manera:

De la puerta a la puerta: solo considera los procesos o actividades del objeto de estudio.

De la cuna a la puerta: se consideran las fases de extracción de materias primas hasta los procesos productivos.

De la puerta a la tumba: se toman en cuenta las actividades o procesos productivos hasta la etapa de la gestión de los residuos generados a lo largo de la producción del producto o servicio.

De la cuna a la tumba: toma en cuenta el ciclo de vida completo del servicio o producto, desde la extracción de las materias primas, hasta la valorización, tratamiento o disposición final de los residuos generados.

7.2. Descripción de las fases del ACV

7.2.1. Definición del objetivo y alcance

Cuando se inicia un estudio de ACV, el objetivo y alcance deben definirse y ser claros con la aplicación que se quiere alcanzar. Comprende los estudios iniciales para conocer el producto y todo lo relacionado con este. Tiene la finalidad de desarrollar correctamente las otras tres fases del ACV, así como la utilización prevista de los resultados. Se abordan asuntos tales como el alcance geográfico, delimitación en el tiempo de estudio, así como el nivel de calidad que se requiere para los datos, por tal razón se deben describir la unidad funcional y los límites del sistema:

Unidad funcional

La unidad funcional constituye una referencia a la cual el conjunto de entradas y salidas del sistema de estudio están relacionadas. El objetivo principal es dar una referencia de comparación entre los flujos involucrados en todo el proceso, en efecto, los impactos ambientales de los productos pueden ser reportados a la funcionalidad del producto y notablemente por poder comparar los productos de una misma categoría entre ellos.

Límites del sistema

Dentro de este punto se establecerán los diferentes límites del sistema del producto, esto es, los componentes, procesos o subsistemas que se van a considerar en el análisis y cuáles quedarán fuera, así como los criterios a los que responde esta decisión. Asimismo, se deben identificar y justificar las entradas y salidas a considerar. Entre ellas se encuentra la adquisición de materia prima, manufactura, procesado y fabricación, distribución y transporte, uso, reutilización y mantenimiento, reciclado y gestión de residuos (Haya, 2016).

7.2.2. Inventario de ciclo de vida (ICV)

En esta fase se recopilan los datos y los procedimientos de cálculo que identifican las entradas y salidas del sistema de estudio, tomando en consideración las descargas al medio ambiente. Es fundamental contar con información muy detallada de cada etapa del proceso productivo, en las cuales se deben asignar tanto los flujos de materia y energía como las emisiones

asociadas que comprenden a dichos flujos, a tareas de procesos que incluye la adquisición de dichas materias primas, manufactura y procesado, distribución y transporte, uso, reutilización y mantenimiento, reciclado y gestión de residuos, y por último a las salidas de efluentes líquidos, emisiones atmosféricas, residuos sólidos u otro tipo de emisiones (Becoña, 2015; OISSFAC, 2011).

7.2.3. Evaluación de impacto

Esta tercera fase es vital para cualquier ACV. La evaluación de impacto ayuda a interpretar las emisiones y los datos de consumo de recursos asociados con el ciclo de vida del producto, contiene la lista que corresponde a materiales y consumo energético del producto estudiado y es interpretado y transformado a indicadores de impactos comprensibles. Estos indicadores expresan la magnitud de la contribución de categorías de impacto a la carga ambiental y se concluyen a través de una serie de pasos recomendados por las normas ISO 14042 donde algunos de estos son obligatorios como la definición y clasificación de categoría de impacto y caracterización (*European Commission*, 2017; Ibrahim, 2011). A continuación, se describen las etapas para obtener la evaluación de impacto ambiental:

Métodos de evaluación

Los métodos de evaluación sirven para convertir el inventario de ciclo de vida en impactos ambientales, utilizando cada uno sus propios indicadores y coeficientes de caracterización, por lo cual se debe elegir de manera adecuada el método a utilizar. En la Tabla 1 se describen los diferentes métodos de evaluación que se pueden usar para el desarrollo del ICV.

Tabla 1. Métodos de evaluación utilizados en el estudio del ICV	
Método de evaluación	Descripción
ReCiPe2016	Proporciona una recopilación de vías causa-efecto para el cálculo de factores de caracterización de punto medio y punto final, tales como calentamiento global, disminución de recursos fósiles, ecotoxicidad acuática, radiación ionizante (punto medio) y daños a la salud humana, ecosistemas y recursos disponibles (punto final). Además, proporciona factores de caracterización que permiten conocer los daños representativos a escala global, continental y regional.
WAVE	Metodología que analiza el consumo de agua y las consecuencias resultantes a lo largo de la cadena de suministro de productos. Considera el agua extraída desde la naturaleza, evapotranspiración y descargas de agua residuales. También analiza el vapor de agua generado en reacciones químicas dentro del proceso productivo.

Tabla 1. Métodos de evaluación utilizados en el estudio del ICV	
Método de evaluación	Descripción
CED	Permite calcular la energía directa o indirecta utilizada a lo largo del ciclo de vida de un bien o servicio. Incluye el análisis de la energía proveniente de recursos fósiles, nuclear, biomasa proveniente de bosques, subproductos de madera, residuos alimenticios y agroindustriales, así como la energía de fuentes renovables como la hídrica, solar, eólica y geotérmica.

Fuente: Elaboración propia con información de (A. J. Huijbregts *et al.*, 2017; Azevedo *et al.*, 2007; Berger *et al.*, 2014)

Categorías de impacto

Una vez que se ha elegido el método de evaluación, los resultados obtenidos se valoran de acuerdo con su magnitud y relevancia. El interés de los impactos ambientales por los que se realiza un ACV se representa a través de la categoría de impacto. En la Tabla 2 se muestran los de mayor relevancia para el sector industrial.

Tabla 2. Listas de las categorías de impacto evaluadas	
Categoría	Descripción
Huella de carbono	Fenómeno observado en las medidas de la temperatura que muestra en promedio un aumento en la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas.
Huella hídrica	Es la categoría que incluye el consumo de agua dulce. Es representada en función del recurso hídrico disponible para la población humana.
Huella energética	Energía consumida en la obtención de materias primas, fabricación, distribución, uso y fin de vida del elemento analizado.

Fuente: Elaboración propia con información de (EUSKADI, 2009; FEC, 2018; Stranddorf *et al.*, 2005; Thylmann, 2017)

7.2.4. Interpretación

La interpretación es una técnica sistemática para identificar, cuantificar, revisar y evaluar la información de los resultados del inventario de ciclo de vida y/o de la evaluación de ciclo de vida. La finalidad de esta fase es determinar el nivel de confianza en los resultados finales y comunicarlos de una manera completa y precisa (Skone, 2000); implica evaluaciones en el nivel de inventario de ciclo de vida y tienen el siguiente orden:

- Mejoramiento del modelo de inventario para encontrar las necesidades según el objetivo de estudio.
- Realizar un análisis de sensibilidad para comprobar limitaciones en la adecuación del trabajo de inventario de ciclo de vida.

- Comprender suposiciones subyacentes cuando una base de datos secundaria sea utilizada en el modelo.
- Combinar los puntos anteriores para refinar el modelo de ACV.
- Realizar una conclusión apropiada y robusta.

7.3. Descripción del cultivo y procesamiento de la caña de azúcar

La caña de azúcar pertenece al género *Saccharum L.*, de la tribu *Andropogoneae* en la familia de las gramíneas. Comprenden tradicionalmente seis especies, de la cuál, en México se cultiva la *S. officinarum*, que es una especie ribereña diversa que crece en los trópicos húmedos como una planta perenne vigorosa de hasta 10 m de altura (OGTR, 2011; Sage *et al.*, 2013). Es originaria de Nueva Guinea y ha tenido una propagación histórica que se remonta a los 4,500 a.C. Se introdujo a México con la llegada de los españoles y su cultivo se expandió por todas las zonas cálidas, tomando importancia hasta el punto de ser exportada a Europa desde la antigüedad hasta hoy en día (Bustamante Lara y Alvarado Silva, 2022; SAGARPA, 2022).

A nivel nacional se utilizan cuatro variedades: CP 72-2086, Mex 69-290, Mex 79-431 e ITV 92-1424, que en su conjunto abarcan más del 70% de la superficie sembrada y cuentan con características de adaptación a distintos climas y altitudes, buen desarrollo fenológico, menor porcentaje de floración, resistencia a enfermedades y tolerancia a plagas (CONADESUCA, 2016) y los estados que más producción tienen se encuentra en primer lugar Veracruz (37.6%), Jalisco (12.8%), San Luis Potosí (7.4%) y otros estados como Oaxaca, Chiapas, Tamaulipas, Tabasco, Morelos, Nayarit y Puebla (57.8%). La caña de azúcar es importante para México, ya que es la materia prima para la industria azucarera, y tiene un consumo per cápita de 36.7 kg al año, lo que representa 5% del producto interno bruto nacional (PIB) (SADER, 2022; SAGARPA, 2017).

7.3.1. Etapa agronómica

En la Figura 2 se presenta la descripción general del proceso de cultivo y transformación de la caña de azúcar. Enseguida se describen las actividades más comunes llevadas a cabo en los campos nacionales.

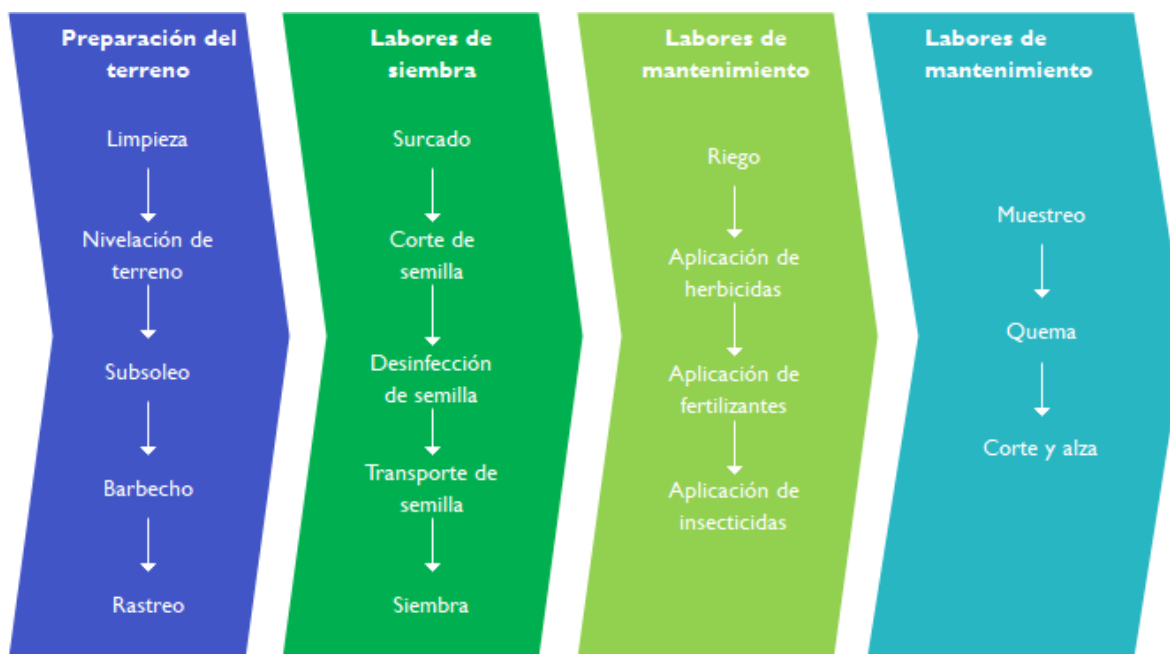


Figura 2. Sistema de producción agrícola de la caña de azúcar

Fuente: Elaboración propia

7.3.2. Preparación del suelo

La preparación del suelo incluye diversas tareas que son obligatorias para tener disponible un terreno apto para la siembra de caña. Es necesario conocer las características del suelo a cultivar, para una exitosa germinación de los tallos y que permita el desarrollo de las raíces. Por ello, existen prácticas de laboreo que se realizan para acondicionar la capa superficial del suelo (de 30 a 40 cm) mediante diversas técnicas de manipulación del suelo, con implementos para la maquinaria apropiados y que a continuación se describen (AEMP, 2010; CENGICANÁ, 2017; CONADESUCA, 2015; Li y Yang, 2015).

Limpieza

Es la práctica de habilitación de un terreno para el cultivo de caña. Se realiza en terrenos nuevos y se lleva a cabo con tractores tipo bulldozer con implementos. Tiene el objetivo de

eliminar la vegetación y piedras existentes. También es posible utilizar motosierras o animales de trabajo para realizar la misma labor.

Nivelación de terreno

Consiste en emparejar y realizar una pendiente para drenar los excesos de agua durante la temporada de lluvias, y al mismo tiempo facilitar la aplicación de riego artificial.

Subsoleo

Se realiza con el fin de romper la compactación generada por el paso de cosechadoras, levantadores y camiones recolectores de la caña. Se realiza con un implemento llamado arado de cinceles.

Barbecho

Esta actividad consiste en invertir las capas de suelo. Se debe tomar en cuenta que, en un suelo húmedo, la maquinaria podría presentar problemas de hundimiento y desplazamiento, pero, cuando se quiere realizar en un terreno seco, dificultaría la penetración del implemento en el suelo seco.

Rastreo

Es una actividad secundaria con la finalidad de deshacer los terrones formados en el suelo y dejar el área de cultivo con aspecto mullido. Para ello, se requieren rastras de discos, clavos o rotativas. Se llegan a repetir hasta tres pasos de rastras dependiendo el tipo de terreno a trabajar.

7.3.3. Labores de siembra

La siembra consiste en realizar diversas actividades complementarias para la correcta disposición de la semilla en el suelo. Por ello, se recurren a diversas técnicas como el surcado, desinfección de la semilla y la propia siembra para obtener rendimientos aceptables. A continuación, se describen las actividades que se pueden realizar durante las labores de siembra (Cruz *et al.*, 2013; Ortiz-Laurel, 2016; Sánchez *et al.*, 2019).

Surcado

Consiste en realizar hendiduras en el suelo generalmente en sentido de la pendiente con ayuda de arado de vertedera o bordeadoras. El diseño del surcado dependerá de la densidad de tallos por hectárea y se realiza para aprovechar el agua de lluvia o de riego artificial y para evitar la erosión del suelo. Las distancias convencionales entre surcos son de 1.2 a 1.3 metros cuando se realiza cosecha manual y de 1. A 1.5 metros cuando la cosecha es mecanizada. Cuando existe riego por goteo, es posible sembrar a doble hilera para instalar las cintillas en medio, en este caso la distancia entre las hileras es de 0.4 a 0.6 metros. La profundidad de los surcos debe ser de 0.25 a 0.30 metros.

Corte y transporte de semilla

Esta actividad se realiza en un lote destinado para la producción de semillas. El corte se lleva a cabo en semilleros con edad de 8 a 10 meses con paquetes de 30 esquejes de longitud entre 0.5 a 0.6 metros. Caja esqueje debe tener de 3 a 5 yemas florales. La semilla debe transportarse un día máximo antes de realizar la siembra a través de plataformas y previamente esquilado para facilitar la distribución y tener una siembra rápida y eficiente.

Desinfección de semilla

Dado que la caña de azúcar es un cultivo de propagación vegetativa, es propensa al ataque de plagas de insectos y enfermedades que provocan una mala germinación. Se ha observado que incluso en condiciones satisfactorias solo germinan un 40-45% de los brotes y para mejorar el rendimiento, existen varias formas de control como utilizar clorpirifos a razón de 1 kg/ha para cada semilla o tallo para mantener libre de terminas y hormigas. Para reducir la transferencia de enfermedad a través del suelo se utiliza tratamiento térmico, es decir, se expone el sedimento a 50 °C durante dos horas, posteriormente se tratan con fungicidas. Si la semilla está infectada con cochinillas, se deben sumergir en una solución de clorpirifos (2 mL/L de agua) antes de plantar.

Siembra

El método de siembra se realiza colocando tallos enteros de caña en el fondo del surco, mediante las técnicas de cordón sencillo o doble y con ayuda de un machete se hacen trozos, quedando un número variable entre 3 a 5 yemas. Es importante considerar que los tallos provengan de semilleros que tengan entre 7 a 8 meses de edad de ciclo de plantillas, enseguida deben sembrarse recién cortados para que contengan alto contenido de agua y nutrientes. La densidad de plantas por hectárea se recomienda que sea de 10 a 12 yemas por metro lineal y si la semilla se considera de óptima calidad, que sea de 7 a 10 yemas por metro lineal.

7.3.4. Labores de mantenimiento

Las labores de mantenimiento de la caña son necesarias para suministrar la cantidad de agua requerida para el correcto desarrollo de la caña, aunado a ello, también se requieren mantener libre de malezas y dar seguimiento y control de plagas para evitar rendimientos bajos a los esperados debido a estos problemas recurrentes. También la aplicación de fertilizantes es una práctica común para obtener aun mejores rendimientos al momento de la cosecha a continuación se describen las actividades llevadas a cabo (CONADESUCA, 2015; DSD, 2020; OECD, 2016; Ortiz-Laurel, 2016).

Riego

El primer riego se aplica de 1 a 2 días después de la siembra. Un segundo riego se debe aplicar a los 10 días después de la siembra. Es factible realizar un tercer riego dependiendo del tipo de suelo cultivado. El primer riego, también llamado riego de germinación, debe aplicarse de como máximo dos días después de la siembra. Si se realiza riego por aspersión, se debe aplicar un volumen total de 105 mm en 3 horas. Cuando se aplica riego por gravedad, la técnica se detiene hasta que el final del surco sea empapado por el agua. Cuando el agua no es limitante durante el año, la técnica se extiende hasta 6 aplicaciones; durante los primeros días después de la siembra, entre los 10 y 12 días, entre los 27 y 30 días, entre los 45 y 48 días, entre los 60 y 65 días y entre los 75 y 80 días (Carr y Knox, 2011; Gunarathna *et al.*, 2018; Kaushal *et al.*, 2012).

Aplicación de herbicidas

La aparición de malezas puede presentarse entre los 30 a 90 días después de la siembra o cosecha anterior. La aplicación de herbicidas tiene como objetivo eliminar cualquier otra planta germinada, por lo general, pastos, sobre todo si se realiza en un terreno nuevo. Para ello, se ocupan bombas de aspersión tipo mochila con consumo de agua entre 185 a 190 L de agua por hectárea. La aplicación del herbicida también se realiza de 11 a 13 días después de la siembra y debe dirigirse directo al surco y un día después de haber aplicado riego. En áreas sin riego, la humedad debe tomarse en cuenta. Una segunda aplicación de herbicida se puede realizar entre los 61 a 66 días, dependiendo si existe nueva maleza que eliminar (CONADESUCA, 2015).

Aplicación de fertilizantes

La fertilización que no presente problemas de insecticidas ni herbicidas se realiza inmediatamente después de la aplicación de riego. Las principales mezclas de productos químicos deben contener nitrógeno, fósforo, potasio y azufre y los requerimientos dependerán de las necesidades de cada lote. Se recomienda aplicar 50% del fertilizante sobre el cultivo de manera mecánica, el fertilizante debe ser aplicado a través de abono y cultivadora de discos sin cinceles. La rastra debe cultivar de forma que entierre el fertilizante sin que deforme los surcos y genere erosión. El 50% restante se debe realizar con la maquinaria lo más cercano al surco (AFF, 2014).

Aplicación de insecticidas

Se aplica herbicida en áreas nuevas con el objetivo de remover pastos. Es recomendable mezclar un adherente con el herbicida, para mejorar su efectividad. La mejor aplicación de herbicida se logra con la utilización de bombas de mochila de presión constante con un volumen aproximado de unos 185-190 litros de agua por hectárea.

El herbicida para labranza reducida debe aplicarse dirigido al surco donde está la cepa vieja del cultivo anterior, unos 30 días después del corte o cuando esta cepa llegue aproximadamente a unos 0.2 a 0.3 metros de alto (Kltimor, 2022).

7.3.5. Labores de cosecha

La cosecha se inicia con el muestreo de la caña, antes del corte se deben revisar las características químicas para decidir que está apta para su procesamiento en la fábrica. Enseguida se puede o no recurrir a la quema, para después realizar el corte y alza en los camiones que transportarán la caña hacia la fábrica de azúcar.

Muestreo

Tiene como objetivo obtener muestras representativas para realizar análisis de laboratorio que son necesarios para conocer el grado de madurez de la caña y así estimar el rendimiento de kilogramos de azúcar por cada tonelada de caña. También se aprovecha para detectar enfermedades y otros indicadores de calidad. Los criterios para considerar para los análisis es el ciclo natural del cultivo (edad) y variedad. Si los parámetros son aceptables, se procede a seleccionar los lotes para el orden de corte de la caña. Este procedimiento es esencial para coordinar las cosechas, mismas que son de extrema utilidad para el procesamiento de la caña, en la molienda (Díaz e Iglesias-Coronel, 2014; Salgado et al., 2003).

Quema

La quema se realiza para eliminar las malezas que impidan el corte de la caña, facilitar su procesamiento y para eliminar plagas dañinas para los cortadores. Esta se realiza de manera no controlada, es decir, se enciende por un extremo la parcela donde comienza a avanzar la llama combustionando todo a su paso, sin embargo, debido a la composición química de la caña, la cual está compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina y a las densidades que acompañan a cada una, se queman a distintas velocidades y temperaturas, llevando así a la combustión incompleta y guardando la fracción que se aprovechará en la molienda.

La quema se realiza de manera programada y debe iniciarse con líneas de seguridad para evitar que puedan ocasionar daños a las áreas circundantes. Se debe tener en consideración la cercanía a carreteras públicas y asfaltadas, al redes de electricidad, a cabeceras municipales, aeropuertos, o centros turísticos. Se debe conocer la dirección y velocidad del viento para las quemas controladas y tener en consideración la dispersión de

partículas que pudiesen iniciar fuego fuera del área de trabajo (Go y Conag, 2019; Oanh *et al.*, 2018).

Corte y alza

El corte de caña se realiza después de 16 meses de la siembra, se puede realizar de dos maneras: con maquinaria y de forma manual. La herramienta usada para el corte manual suele ser un machete grande de acero, un gancho en la parte posterior y empuñadura de madera. La caña se corta cerca del suelo al igual que por el extremo superior, cerca del último nudo maduro, ya cortadas se apilan a lo largo del campo para formar un bulto en la superficie del suelo, de donde se recogen a mano o a máquina para su transporte al Ingenio.

La cosecha mecanizada se realiza con máquinas que operan con equipos autovolcables con capacidad de 8 a 12 toneladas, para el trasbordo de la materia prima a unidades de transporte de alta capacidad de carga, son movidos por tractores y/o camiones. En otros casos, la cosechadora carga directamente sobre el equipo de transporte, evitando el costo de una alzadora mecánica (de la Vequia, 2017).

La expansión de este sistema está fuertemente asociada a la reducción del costo de cosecha y su efecto en la rentabilidad del cultivo. Tienen la ventaja de dejar una mínima cantidad de caña en el campo, por lo que proporcionan mejoras en la eficiencia y costo del transporte, ya que se logra cargar más cantidad de caña en un solo viaje gracias a la caña en trozos que ocupa menos espacio que la caña larga, incrementando la capacidad de carga de los equipos de transporte (Sieiro *et al.*, 2021).

Transporte

El transporte de la caña es de gran importancia, ya que su objetivo es recolectar la caña disponible, garantizando el suministro de caña oportuno y suficiente a la fábrica, para lograr un menor tiempo entre cosecha y molienda, con bajos niveles de hojas, despunte y tierra y al menor costo, pues el principal propósito es obtener azúcar de alta calidad y a precios competitivos. Cabe resaltar que cualquier variación que se registre en esta etapa, resultará de gran impacto en la rentabilidad del producto (Aguilar Rivera, 2014).

7.4. Etapa industrial

7.4.1. Recepción de caña

Los camiones que transportan la caña de azúcar se pesan en básculas y se dirigen al patio destinado para la descarga de la caña a través de grúas especiales. Existen distintas formas para descargar la caña que se diferencian por el tipo de transporte utilizado; camiones, remolques o ferrocarril y las que son recibidas por carretas. El tipo de vehículo de transporte utilizado afecta las operaciones de descarga y existen distintas maneras de realizar la transferencia de caña: mediante volcadores de hilos, grúas mecánicas y de forma manual. La descarga mediante grúa consiste en un brazo que sostiene una horquilla utilizada para sostener la materia prima y así descargar a razón de 3, 6 y 10 toneladas en una sola operación. La caña transferida puede colocarse en las mesas transportadoras de caña o si se encuentra a pleno funcionamiento, se coloca en el suelo en el área específica de almacenamiento temporal (Lecler, 2017; Moodley, 2010).

El sistema de volcador de hilos funciona con cadenas y camiones adaptados con cadenas debajo de la caña a cada lado del remolque de tal manera que se forma una red que ayudan a levantar la caña en solo una operación con ayuda de una grúa fija, de esta manera, la caña transporta por un camión entra a la mesa transportadora hacia las siguientes operaciones. La descarga manual se requiere cuando la operación de transferencia por medio de grúas no removi6 toda la caña, es ah6 cuando trabajadores entran al camión para vaciar aquellos 6ltimos tallos que quedaron remanentes en el veh6culo.

Limpieza

Se realiza con el objetivo de remover impurezas que representen problemas en equipos de preparaci6n de la caña, ya que, durante el corte y levante de la caña, restos de lodo, arena y piedras pueden transferirse desde los campos y llegar a la f6brica. Esta situaci6n incrementa cuando se practica la quema de caña, debido a que la cera que cubre el tallo de la caña se derrite parcialmente y la superficie de la planta quemada se vuelve pegajosa, mismo que provoca que tierra y holl6n generados se adhieran a los tallos, introduciendo m6s suciedad y part6culas de basura carbonizada. (Baikow, 2013; Guilharduci *et al.*, 2017).

Para asegurar la limpieza de la caña, un método comúnmente utilizado son las mesas de lavado, que consisten en un sistema de arrastre de la caña que se hace pasar por aspersores de agua. Suelen requerir de 2.8 a 3.75 L de agua por minuto por tonelada de caña molida por día. Para un óptimo funcionamiento, la mayoría de las superficies de las mesas de carga y lavado son paralelas entre sí y están inclinadas entre 13 y 14 grados a la horizontal para asegurar el drenaje hacia atrás del agua residual. Estos sistemas cuentan con “pateadores” en la zona de aspersión que son brazos soldados en la zona superior de la mesa unidas a ejes para asegurar el lavado completo de la caña mediante el esparcimiento de la caña sobre la mesa de conducción. Existen otros métodos de limpieza que en vez de utilizar agua emplean flujos de aire proporcionados por ventiladores situados debajo de la mesa alimentadora con eficiencias reportadas entre 17 a 49% para materia orgánica y 18 a 78% para materia inorgánica (Soares *et al.*, 2019; Vélez, 2010).

Reducción de tamaño de la caña

Se utiliza juegos de cuchillas para reducir el grosor del tallo y nudo de la caña de azúcar, convirtiéndola en una fracción homogénea y compacta, mismas que mejoran la extracción de jugo. El dispositivo utilizado consiste en un eje de forma cuadrada, hexagonal u octagonal fijado sobre rodamientos. Sobre el eje tiene brazos cada uno con hojas de cuchillas colocadas simétricamente y accionados por turbinas de vapor o motor eléctrico. Se emplean dos tipos de cuchillas; una para nivelar la caña y otra para cortarla. La primera se refiere al ajuste del colchón contenido sobre la mesa transportadora. El objetivo es mantener un nivel requerido por lo que existe una proporción de caña sin cortar. Las segundas cuchillas por el contrario tienen el efecto de completar el corte de la caña proveniente del primer juego de cuchillas (Mendoza Haro y García Granizo, 2017).

Otra operación que se realiza para la reducción del tamaño de la caña es el desfibrado o desmenuzado, tiene la finalidad de desintegrar la caña para facilitar aún más la extracción de jugo. Su función se debe a que requiere una fuerza que aplaste los tejidos de la caña ya que son muy resistentes, por lo que, al realizarlo en un paso previo a la molienda, disminuye la carga de trabajo de los molinos. Una desmenuzadora consta de placas con un extremo en

forma de martillo con dientes de sierra o barras rectangulares separadas entre sí de 10 a 25 milímetros, el otro extremo está unida a un eje giratorio (Mathewos *et al.*, 2019; Podany *et al.*, 2013; Sasso *et al.*, 2022).

7.4.2. Molienda

La caña preparada se lleva hacia una serie de molinos donde se extrae jugo. Cada molino está conformado por tres o cuatro rodillos de acero con ranuras que ejercen presión sobre la caña y funcionan a través de turbinas de vapor o motores eléctricos. Durante la extracción, se obtienen una fracción líquida correspondiente al jugo de caña y una fracción sólida-líquida correspondiente al bagazo. Esta última contiene fibra, agua y sacarosa, por lo que el bagazo pasa a través de molinos subsiguientes para extraer una fracción más de jugo. Los molinos se encuentran configurados en serie de cuatro o cinco dispositivos, al último de ellos se le agrega agua caliente para recuperar la sacarosa contenida en el bagazo. A este procedimiento se le llama “maceración” y esta agua se recircula del último al penúltimo molino. De esta manera, la cantidad de agua y azúcar recuperada de los últimos molinos se mezcla con la extracción realizada por el molino 1. A la combinación de ambos flujos se le conoce como jugo mezclado, y este se envía hacia la etapa de purificación (Birru, 2016; Lobo *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2021).

7.4.3. Purificación de jugo

El jugo extraído se conduce por un separador de bagazo, que consiste en un dispositivo que filtra el jugo y retiene partículas de bagazo. Las partículas de bagazo o “pachaquil” son recirculadas al primer molino. También existe un segundo tamiz con mallas con separación de 1 mm para retener el bagazo fino o “bagacillo” que no se retuvo en el primer separador. Enseguida, el jugo libre de la mayor cantidad de partículas de bagazo recibe distintos tratamientos químicos que pueden o no ser necesarios dentro del proceso. La aplicación de cada uno depende de las características de la caña molida y los tratamientos se basan en el uso de óxido de calcio (CaO), dióxido de azufre (SO₂) y ácido fosfórico (P₂O₅) (Laksameethanasana *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2014; Panigrahi *et al.*, 2021).

La aplicación de óxido de calcio tiene la función de eliminar ácidos orgánicos y mantener el pH requerido. Se puede colocar de manera directa en forma sólida o diluida en agua o también llamada lechada de cal. La primera opción es la menos eficiente, ya que se diluye lentamente y ciertas regiones del jugo, pueden quedar sin cal y otras donde se concentre aún más. La segunda opción presenta una mayor difusión ya que previamente se preparó en tanques especiales y estos se dosifican al flujo de jugo mezclado inmediatamente. Por otra parte, el uso de dióxido de azufre transforma las sales férricas que pueden formarse en molienda y tuberías en compuestos ferrosos incoloros. Su preparación inicia con la combustión del azufre en hornos para finalizar en el mezclado con el jugo. Usar este compuesto da ventajas en la decantación al llevar a cabo en menor tiempo la clarificación (Herrera Álvarez *et al.*, 2020; Verma *et al.*, 2019).

El ácido fosfórico se encuentra en la caña de forma de fosfato soluble, mismos que intervienen en la alcalización. Se ha corroborado que, a mayor cantidad de ácido fosfórico, la clarificación se realiza con mayor facilidad. Por lo que se vuelve necesario agregar dicho compuesto antes de la alcalización, lo que implica agregar más cal, ya que el ácido fosfórico disminuye el pH. El uso de este compuesto tiene la ventaja de mejorar la clarificación para jugos con bajas concentraciones de ácido fosfórico. Por último, se deja reposar el jugo tratado en tanques el tiempo necesario para llevar a cabo la decantación. De manera discontinua, el jugo se llena una sola vez y se espera a que se separen las fases; el sedimento generado se extrae por la sección inferior del tanque mientras que el jugo se extrae posteriormente (Domínguez-Domínguez *et al.*, 2012; Thai *et al.*, 2012).

De manera continua, un clarificador es un tanque al que se le hace llegar constantemente jugo por decantar. Por la parte superior existe escurrimiento de jugo claro, por la parte inferior, se extraen los sedimentos o “cachazas”. Este dispositivo presenta las ventajas de eliminar la mano de obra para vigilar una decantación discontinua, se ahorra tiempo a comparación de llenado y vaciado o al intercambiar circuitos de alimentación entre tanques discontinuos (Hugot, 1984).

7.4.4. Evaporación

El jugo claro recuperado de la purificación es una disolución de azúcar y agua. En esta etapa se prioriza remover el agua para llevar al máximo la concentración de azúcar. En la práctica, es imposible eliminar todo el líquido contenido en el azúcar, y al producto se generado se le llama “meladura”. Para llevar a cabo esta etapa, la evaporación se lleva a cabo en dispositivos llamados evaporadores, que consisten en una calandria tubular que tiene la función de intercambiar la temperatura entre el vapor de calentamiento y el jugo de caña. Dicha calandria posee tubos que son envueltos de vapor y por el interior se encuentra el jugo por evaporar. Esta operación logra remover hasta 80% del peso de la caña.

Los vapores de agua generados en un primer evaporador se pueden utilizar para los evaporadores siguientes bajo ciertas condiciones de presión, a esta configuración se le conoce como “múltiple efecto” y tiene las ventajas de aumentar la diferencia de temperatura entre el vapor y el jugo y permite realizar la evaporación a temperaturas menores a los 110°C. La meladura obtenida en el último evaporador es enviada a un tanque recuperador. Por el contrario, cuando la meladura se transfiere a los tachos (dispositivos utilizados para calentar la meladura y promover la cristalización) ahora se le conoce como “masa cocida”, la cual se caracteriza por pasar de estado líquido a sólido-líquido (Hugot, 1984).

Cuando el jugo se concentra entre los 77 a 80 ° brix, comienza la aparición de cristales, es decir, el producto obtenido de la evaporación pasa de estado líquido a sólido-líquido y recibe el nombre de “masa cocida”. Por sus características no es posible calentarlos en un evaporador como los descritos anteriormente, si no en un evaporador de un solo efecto. Para este entonces, la masa cocida se encuentra saturada, y dicha saturación disminuye conforme los cristales se forman y crecen. Para llegar a lo anterior, se utilizan dispositivos (tachos) donde la masa cocida se evapora para concentrar de azúcar el contenido, y si hace falta, se agregan cristales de azúcar y jarabe de según se evapora el agua. Al contenido interior de los tachos, se le conoce como “templa” y existen hasta cuatro configuraciones posibles (Golato, 2014):

Sistema de dos templas

Consiste en formar dos tipos de masas cocidas; la primera conformada con 75% de pureza y alimentada de mieles de alta y baja pureza, obtenidas de centrífugas. La segunda conformada con 60 de pureza y alimentada con mieles de baja pureza.

Sistema de tres templas

Se prioriza la obtención de una masa cocida “A” de 80 a 85% de pureza, retroalimentada con mieles de “A”. una segunda masa cocida “B” con pureza de 70 a 72% y retroalimentada con mieles de “B” y una masa cocida “C” con pureza de 60% y retroalimentación de mieles de “B”.

Sistema de cuatro templas

Busca obtener una masa cocida “A” con pureza de 87, proveniente de la meladura. Una masa cocida “AB” con pureza de 80% y obtenida de 1/3 de meladura y 2/3 de miel “A”. La tercera masa cocida “B” a partir de 1/4 de meladura y 3/4 de miel de “AB”. La última masa cocida “C” se forma con 1/8 de meladura y 7/8 de mieles de “B”. Cuando las mieles se recirculan, llegan a cierto momento donde ya no se puede recuperar azúcar de ellas, por lo tanto, se les define como “mieles agotadas”.

7.4.5. Cristalización

Se produce cuando la meladura se concentra y la sobresaturación llega a un valor determinado. Se alcanza mediante los métodos siguientes: El primero consiste en la espera progresiva para que los cristales de la meladura aparezcan de manera espontánea. Se requiere que los brix sean de 80° o bien, se puede agregar meladura a menor temperatura, a lo que se le llama “cristalización por choque” (Hugot, 1984).

El segundo consiste en utilizar azúcar refinada molida conocida como “semilla” introduciéndola al tacho por cualquier válvula destinada para ello y debe estar bajo nivel de la meladura y sin alimentación de vapor para evitar la disolución de los cristales de azúcar añadidos. A partir de este momento, los cristales empiezan a crecer. Cuando se toman

muestras de la masa cocida y se observan mayoritariamente cristales, la templa se vacía cortando la conexión del vacío y se abre paso a la presión atmosférica, logrando así descargar el material hacia los cristalizadores o al mezclador. En este momento que el tacho se encuentra vacío, y se aprovecha a lavar con vapor para disolver el azúcar incrustado (Frenzel, 2020).

7.4.6. Centrifugación

Las templeas que contienen lo mínimo requerido de licor madre, pasa por centrífugas para la separación del líquido restante y el azúcar en su forma comercial. Esta operación se lleva a cabo en dispositivos llamados centrífugas, que son máquinas en forma de canasta cilíndrica diseñada para aceptar la masa cocida sobre un eje central. La canasta está formada por orificios con malla de cromo-cobre o acero niquelado que permiten el paso de las mieles, pero no el de los cristales de azúcar. Durante la operación de las centrífugas se deben tener en cuenta que para masas cocidas de alta pureza se requiere utilizar agua o vapor para lavar los cristales de azúcar impregnadas con miel, por lo que se debe ser cuidadoso para no agregar agua en exceso y diluir la miel recuperada. También es necesario mantener limpias las telas de la centrífugas, por lo que al menos una vez al día, se deben limpiar con vapor para remover los cristales alojados en las perforaciones (Baikow, 2013).

7.4.7. Secado

El azúcar recuperado de la centrifugación contiene alrededor de 0.5 a 2% de humedad. Esta humedad se vuelve de importancia cuando es mayor al 1%, ya que disminuye la calidad del azúcar por el deterioro de las características requeridas para el comprador. Para la conservación del azúcar, se debe colocar en sacos y mantener la precaución de no embolsar a más de 38°C, se deben colocar sobre estibas y papel bituminado y lejos de paredes. El almacén no debe sobrepasar el 65% de humedad y se debe encontrar a temperatura uniforme.

Otra forma de almacenar el azúcar es a granel a través de silos. De esta manera, la base del producto almacenado forma una capa absorbe humedad y forma una barrera que impide que la humedad atraviese el resto del azúcar almacenado. Este sistema se favorece en

regiones cálidas. Por lo anterior, cuando el azúcar tiene un contenido de humedad del 0.2 a 0.5% el deterioro de la calidad del azúcar disminuye, es por ello por lo que se emplean secadores para reducir la humedad contenida después de la centrifugación. De esta manera, el azúcar se conserva mejor, y aumenta la polaridad. El secador se conforma por un elevador, un secador rotativo, un calentador de aire, un ventilador, un ciclón, un separador de polvo, una chimenea, un segundo elevador y una báscula automática. Consiste en calentar aire y ponerlo en contacto con el azúcar, de esta manera, el agua contenida en el azúcar se evaporará (Hugot, 1984).

VIII. Marco contextual

El proyecto se llevó a cabo en el Ingenio de Mahuixtlán S.A. de C.V., ubicado en el municipio de Coatepec, Veracruz, México. Este ingenio azucarero se dedica a la transformación de la caña de azúcar producida en la misma zona local y la procesa para la obtención de azúcar blanca o azúcar estándar. Dicha azúcar producida es vendida por toneladas o refinada en sus instalaciones a las afueras de la misma localidad. La Figura 3 y Figura 4 muestra los límites de la zona de estudio.



Figura 3. Zona de influencia de los cultivos de caña
Fuente: Google earth.




Zona de estudio		Ingenio	de	Coordenadas:	Perímetro: 911 m
Mahuixtlán				19°24'31.6"N	Área: 32,325 m ²
				96°55'02.8"O	

Figura 4. Zona ocupada por el Ingenio Mahuixtlán
Fuente: Google earth

IX. Metodología

En la siguiente sección se describen los procedimientos que se siguieron en cada actividad de acuerdo con los lineamientos de las normas internacionales y nacionales ISO 14040, ISO 14044, NMX-SAA-IMNC-2008 y NMX-SAA-14044-IMNC-2008. El proyecto de investigación se llevó a cabo en vinculación del Ingenio Mahuixtlán S.A de C.V. y la Universidad Veracruzana. En la Figura 5 se muestra un diagrama que representa las etapas sucesivas para llevar a cabo la evaluación del desempeño ambiental del cultivo y procesamiento de la caña de azúcar. Posteriormente se describe cada actividad de manera detallada.

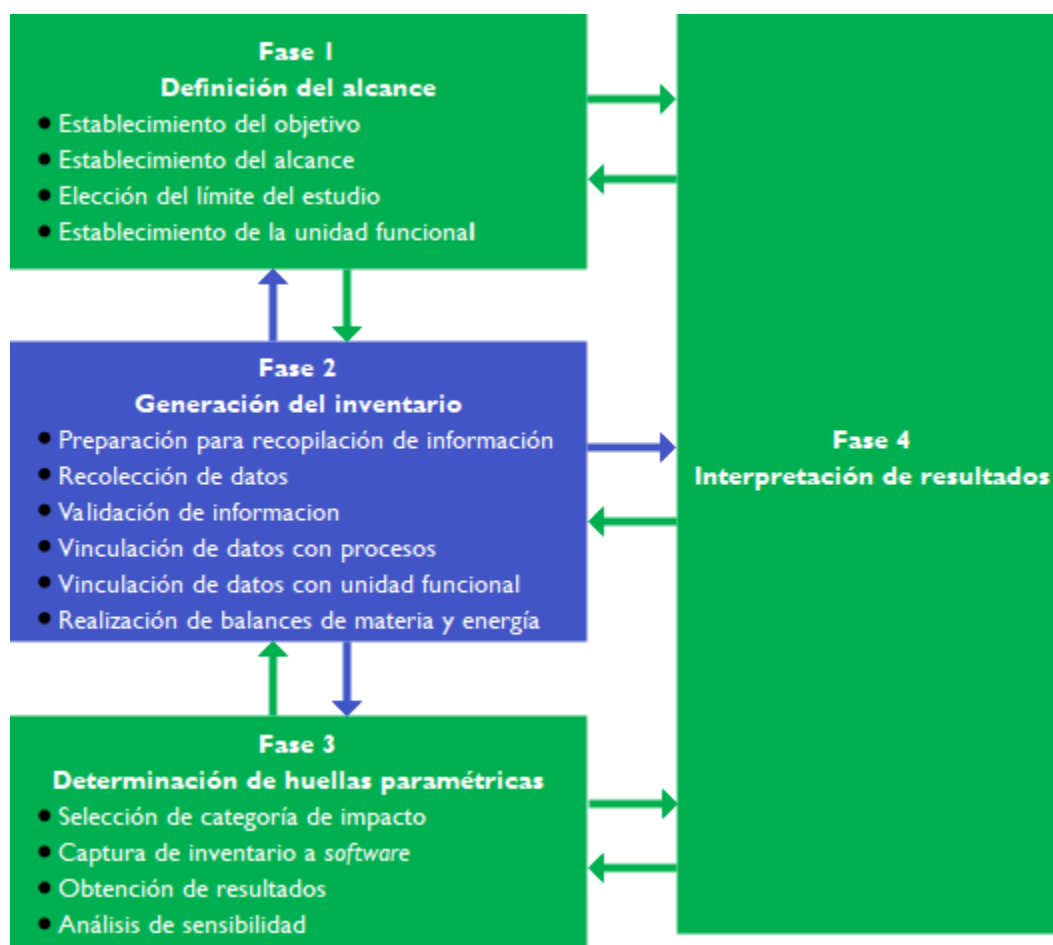


Figura 5. Diagrama de la metodología aplicada en este estudio.

Fuente: Elaboración propia

9.1. Definición del alcance

10.8.1. Establecimiento del alcance

Definir el alcance debe incluir el sistema de estudio a analizar, la unidad funcional, los límites del sistema, los requisitos necesarios para asegurar calidad de datos y limitaciones del trabajo. Es por ello por lo que se deben analizar el sitio de estudio, extensión física del área a estudiar, temporalidad y accesibilidad, previo a iniciar con las siguientes etapas del proyecto, sin embargo, esta primera fase se puede modificar conforme se recopilen datos e información, y así, planear nuevos alcances para cumplir los objetivos.

10.8.2. Establecimiento de la unidad funcional

La unidad funcional define la cuantificación de las funciones identificadas del sistema del producto. Por lo tanto, primero se establecieron las características operacionales del sistema y a partir de ello, se eligió una cantidad para relacionar las entradas y salidas. Dicha unidad funcional fue crítica desde el punto de vista que debe asegurar comparaciones entre otros sistemas de estudios similares. Para ello, se estableció como unidad funcional (UF) como 100 gramos de azúcar, que es el resultado de dividir la cantidad promedio de azúcar consumida al año por habitante en México (SADER, 2023). Todos los cálculos llevados a cabo se encuentran en el anexo C. Se calculó con la ecuación 1.

$$UF = \frac{\text{consumo de azúcar al año por habitante} \left(\frac{\text{kg azúcar-habitante}}{\text{año}} \right)}{\text{días al año} \left(\frac{\text{días}}{\text{año}} \right)}$$

Ecuación 1

10.8.3. Elección del límite del estudio

Este trabajo fue “de la cuna a la puerta”, debido a que se tomó en cuenta la producción de la caña hasta la obtención de azúcar comercial. Por lo tanto, para obtener resultados apegados a la realidad, se consideraron las actividades de la etapa agrícola, que consideró la preparación del suelo, siembra, riego, tratamientos químicos, quema y cosecha. Para la etapa industrial, se incluyó el traslado de la caña del campo al ingenio, recepción de la materia

prima, molienda, clarificación, evaporación, cristalización, centrifugación, secado y empacado, generación de vapor y energía eléctrica. Así como insumos utilizados durante el procesamiento de la caña y el mantenimiento de los dispositivos.

10.8.4. Calidad de los datos

Los datos que se recopilaron a lo largo del estudio se obtuvieron de distintas fuentes. En la figura siguiente se muestra un diagrama donde se le asigna como información de primer nivel a los datos obtenidos directamente en visitas de campo, seguido datos calculados a través de balances de materia y energía con la propia información de la empresa y por último datos obtenidos a través de literatura especializada.

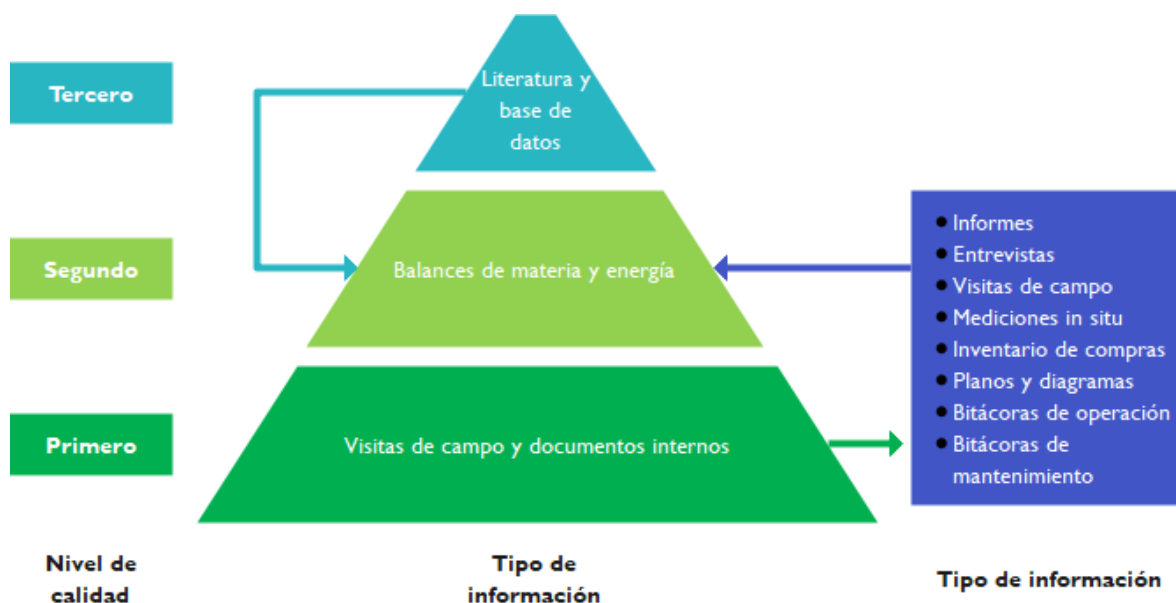


Figura 6. Nivel de calidad de datos para el ACV de la producción de azúcar.

Fuente: Elaboración propia

9.2. Generación del inventario

9.2.1. Preparación para recopilación de información

Esta actividad se realizó en primer lugar mediante la búsqueda de información cualitativa en la literatura especializada. Enseguida se estableció contacto con la empresa para presentar la propuesta de investigación. Una vez aceptada y cumpliendo los requisitos administrativos, se realizaron visitas de campo a las zona de producción con la finalidad de conocer las tareas

y labores específicas llevadas a cabo en el sitio de estudio; operaciones y procesos, productores de caña, personal en fábrica, organismos internos y externos que participan directa o indirectamente. Por lo anterior, se prepararon entrevistas y cuestionarios que fueron aplicados a productores de caña, obreros, jefes de planta y proveedores de insumos y se encuentran en el ANEXO A. En la Figura 7 se muestra el diagrama de flujo con las etapas para la creación del inventario de ciclo de vida.

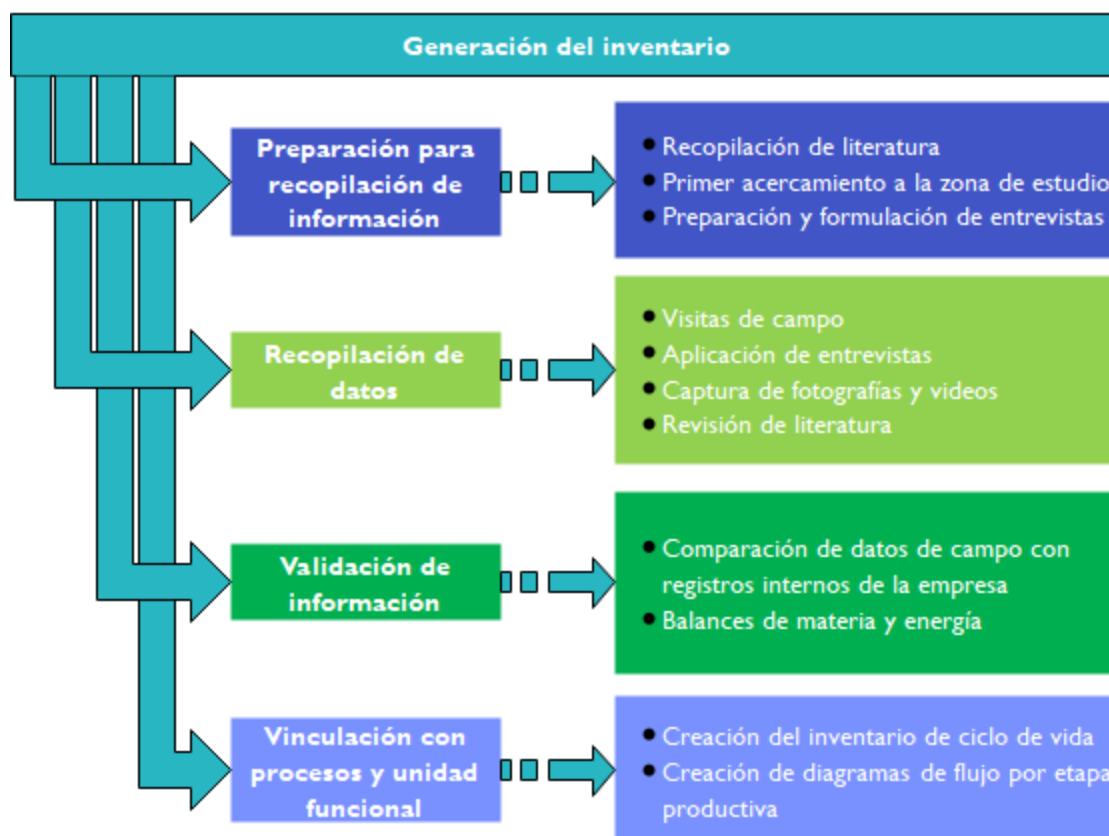


Figura 7. Procedimiento para la generación del inventario de ciclo de vida.

Fuente: Elaboración propia

9.2.2. Recolección de datos

La recolección de datos se inició en enero de 2022 con visitas semanales hasta agosto de 2023. Tiempo que fue destinado para visitar las zonas de cultivo de caña, entrevistar productores, recopilar y registrar lectura de datos específicos, analizar de manera particular el funcionamiento de la maquinaria agrícola e industrial, realizar mediciones de fugas, y aplicar las entrevistas y cuestionarios. Se consultaron distintas dependencias con base de

datos de los productores para las entrevistas de campo. Datos específicos que no se lograron obtener de las entrevistas de campo, fueron consultadas y verificadas a través de artículos y reportes publicados a nivel regional e internacional. Toda la información se recopiló en hojas, grabaciones de audio, video y fueron registrados en un procesador de datos.

9.2.3. Validación de información

Los datos proporcionados en entrevistas fueron validados a través de documentos oficiales de la empresa; fichas de registros de datos de operación, reportes diarios, semanales, mensuales y por año, cédulas de operación e informes de fábrica. También, se validaron los datos de manera cuantitativa con balances de materia y energía y factores reportados en literatura. La información o datos que resultaron inconsistentes fueron aclarados en nuevas visitas de campo. Otros datos que no fueron obtenidos de manera directa de la empresa se obtuvieron de artículos científicos, reportes gubernamentales o documentos emitidos por instituciones del sector azucarero.

9.2.4. Vinculación de datos con procesos y unidad funcional

Para relacionar los datos obtenidos en todas las visitas de campo realizadas, se generó una base de datos con los materiales y las características correspondientes a todos los procesos, incluyendo datos de operación, temperaturas, flujos de materia, consumos de energía, emisiones atmosféricas, al agua y al suelo, residuos generados y emisiones directas a la naturaleza. Se organizaron en un procesador de datos mediante sus cantidades, unidades, etapa de proceso vinculada, subetapa, tipo de flujo, estado físico, tipo de consumo y fuente de la información. De manera paralela se calcularon los flujos de materia y energía de la información recopilada y se relacionaron a la unidad de una tonelada de azúcar producida, creando así el inventario de ciclo de vida, el cual contiene el material o sustancia, cantidad relacionada a la unidad funcional. Debido a la extensión del inventario de ciclo de vida, los procedimientos de cálculo se muestran en el anexo C.

Adicionalmente, se crearon diagramas de flujo que representaron todas las operaciones y procesos unitarios correspondientes a la etapa agrónoma y la etapa industrial,

incluyendo límites de procesos, entradas de flujo principal, insumos, recirculaciones, pérdidas de materia, energía, emisiones al suelo, agua y aire.

9.3. Determinación de huellas paramétricas

9.3.1. Selección de categorías de impacto

Las categorías de impacto seleccionadas fueron la huella de carbono, huella hídrica y huella energética. Estas huellas se analizaron por su relevancia económica, ambiental y social en virtud que las emisiones de gases efecto invernadero se relacionan con la contaminación generada a lo largo de toda la producción de azúcar y que contribuyen al cambio climático, el consumo de agua con la demanda requerida por el campo y la industria, ya que representa un bien escaso que puede afectar a la sociedad que la consume y su disponibilidad en la naturaleza. En el mismo sentido, el consumo energético referido a las fuentes básicas, secundarias o terciarias que suministran de energía al sistema de estudio y que depende fuertemente de la economía de la empresa. En su conjunto, implica posibilidades de manejo para detectar oportunidades de mejora que a la vez se relacionan con ahorros económicos.

9.3.2. Captura de inventario a software especializado

Esta actividad se llevó a cabo capturando desde el procesador de datos, el inventario de ciclo de vida generado en la etapa metodológica “vinculación de datos con procesos y unidad funcional”. En este punto, se trasladó toda la información generada en el inventario de ciclo vida hacia el software especializado SimaPro. En él, se reprodujeron todas las etapas correspondientes al proceso de cultivo de la caña y la producción de azúcar, reflejando así la trayectoria real del sistema.

9.3.3. Obtención de resultados

A través de ejecuciones computacionales, se obtuvieron los resultados en forma de huellas paramétricas para cada proceso unitario correspondiente a la etapa agrícola e industrial, incluyendo el desempeño de cada dispositivo por etapa de proceso. Estos resultados fueron obtenidos a través de tres métodos de cálculo distintos, los cuales corresponden a la huella de carbono, la huella hídrica y la huella energética, correspondientes a las etapas agrónoma

e industrial. De tal forma que se obtuvo el resultado global al realizar la suma de cada operación y proceso dentro de los límites seleccionados.

9.3.4. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se llevó a cabo con la modificación de parámetros elegidos de manera estratégica relevantes para el sistema de estudio. Para ello, se modificaron valores de distancias recorridas por el suministro de insumos; se cambiaron los tipo de transportes utilizados, y se analizaron nuevas recirculaciones de energía y los valores de humedad en el combustible utilizado en calderas. Para cada uno de ellos, se obtuvieron resultados individuales que se utilizaron para la discusión de resultados.

9.3.5. Interpretación de resultados

En esta actividad, se identificaron problemas significativos basados en los resultados del inventario y las huellas ambientales; junto con el análisis de sensibilidad se consideró una interpretación completa que permitió crear conclusiones, conocer las limitaciones en la recopilación de información del sistema de estudio y datos no registrados por la empresa, las cuáles ayudaron para proponer recomendaciones acorde a mejorar el desempeño ambiental del sitio estudiado.

X. Resultados del análisis de ciclo de vida

10.1. Definición del objetivo y alcance

En este trabajo se realizó el diagnóstico ambiental del cultivo y procesamiento de la caña de azúcar en el ingenio azucarero “Mahuixtlán S.A de C.V.”, en el municipio de Mahuixtlán, Veracruz, México. Se creó el inventario de ciclo de vida de acuerdo con las normas ISO 14040 e ISO 14044 y su equivalente nacional NMX-SAA-14040-IMNC-2008 y NMX-SAA-14044-IMNC-2008, que incluyeron la etapa agrónoma e industrial, así como materia prima, insumos, transporte, recursos naturales, consumos y pérdidas de energía, generación de residuos, emisiones al agua, aire y suelo, en cada una de las etapas del sistema productivo para la producción de 100 gramos de azúcar.

10.2. Función del sistema del producto

El sistema de estudio tiene la función sembrar, fertilizar, aplicar riego, quemar y cosechar caña de azúcar y de transportar, recibir, moler, clarificar, evaporar, cristalizar, centrifugar y secar el azúcar obtenido de caña de azúcar, con cristales de tamaño de 0.6 milímetros y 0.02% de humedad como producto principal. Como funciones secundarias se utiliza bagazo de caña para generar energía, cachaza, cenizas para aplicación en campos de cultivo y la melaza para venta.

10.3. Unidad funcional

El azúcar es un ingrediente de primera necesidad ampliamente utilizado en la industria alimenticia y en hogares, con base a ello se propuso como unidad funcional la cantidad azúcar consumida diariamente per cápita de acuerdo con lo reportado por SAGARPA (2017).

10.4. Unidad de referencia

La unidad de referencia que satisface la unidad funcional son 100 gramos de azúcar consumidos per cápita.

10.5. Alcance

En este trabajo se consideró la etapa agrónoma y la etapa industrial de la producción de azúcar. Para la etapa agrónoma, se tomaron en cuenta los productos químicos, transporte de

insumos y traslado de caña a la fábrica, consumo de agua para riego, residuos sólidos generados, emisiones de productos químicos al agua, suelo y aire y la captura de carbono durante el crecimiento de la planta. Para la etapa industrial, se consideró los insumos durante la fase operativa o zafra, transporte de recursos, agua consumida desde la fuente de extracción, emisiones de agua residual, emisión de gases a la atmósfera y residuos sólidos generados, así como la disposición realizada.

10.6. Descripción del proceso

En esta sección se muestran las etapas de producción del azúcar. La secuencia en la que se muestra es la que se sigue de manera rigurosa en campo. Las citas agregadas corresponden a las personas entrevistadas en la zona de estudio.

10.6.1. Etapa agrónoma

Para la descripción de los procesos que se llevan a cabo dentro del área de estudio, la primera etapa se dividió por tareas similares; comenzando por la preparación del terreno que incluye las actividades subsolado, rastreo y surcado, tal como se muestra en la Figura 8. Enseguida por actividades intermedias como la siembra, la fertilización y el riego, como se observa en la Figura 9. Por último, actividades que conforman la cosecha; quema, corte y levante de la caña, que se ilustra en la Figura 10. La información concerniente a la etapa agrónoma se basó conforme a las entrevistas de campo proporcionadas por los productores locales (Arellano, 2023; Colorado, 2023; Cordoba, 2023; Cortéz, 2023; J. Díaz, 2023; Hernández, 2023; Klunder, 2023; Malostro, 2023; Reyes, 2023; Rodríguez, 2023; Vasquez, 2023).

Preparación del terreno

Subsolado

Consiste en el uso de maquinaria e implementos llamados fierros o subsuelos que se utilizan en el terreno destinado para el cultivo de caña, con la finalidad para romper y mover capas profundas del suelo. Se lleva a cabo para mejorar la estructura del suelo, romper capas duras o compactadas, aumentar la aireación y facilitar la penetración de raíces, agua y nutrientes del suelo. Para ello se utiliza un tractor junto con el implemento en trabajo de 8 a 10 horas durante cuatro días consumiendo en promedio 30 litros por día.

Rastreo

Esta práctica se utiliza para ayudar a nivelar el terreno, donde se utiliza un tractor y un implemento llamado rastras de discos, que permite facilitar la operación de maquinaria agrícola y la gestión eficiente del agua en el cultivo cuando se aplica el rastreo del terreno. Esta labor se realiza de un a un día y medio con nueve horas de trabajo por día y un consumo de 30 litros de diésel durante la actividad. En ella se rompen y nivelan los terrones de tierra, mejorando la estructura del suelo, ya que con ella facilita la penetración de las raíces de la planta y mejora el drenaje del agua.

Surcado

Se aplica para contar con un correcto espaciamiento en la plantación, también para facilitar el manejo del agua y evitar encharcamientos y el control de malezas, ya que permite prácticas más efectivas para la aplicación de herbicidas. Para esta actividad, se utiliza un tractor que consume en promedio 13 litros en tres horas de trabajo. Tiempo suficiente para surcar el terreno. Por otra parte, se realiza una actividad adicional que se llama limpieza de surcado; en esta participan ocho personas durante siete horas de trabajo donde utilizan el azadón para remover maleza de las orillas del terreno. Esta se realiza una vez por ciclo de cultivo.

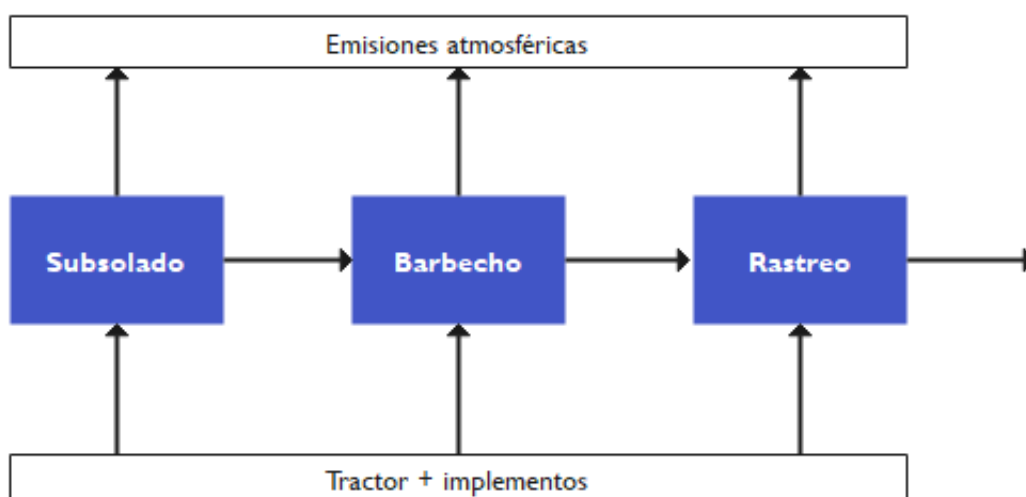


Figura 8. Diagrama de flujo que conforman la preparación del terreno

Fuente: Elaboración propia

Siembra

Para realizar la siembra, se requiere que se suministre de semilla de caña proveniente de campos de cultivo de la misma región. Para el cultivo de una hectárea se requieren de ocho a 10 toneladas de semillas, las cuáles se transportan en camionetas con promedio de tres viajes. La semilla no recibe ningún tratamiento químico posterior, ya que enseguida, ocho personas se encargan de descargar las semillas de la camioneta en el terreno a cultivar. Para ello, cada una utilizan un machete para cortar la caña y un azadón para cubrirla con tierra. El tiempo que se llevan para dicha actividad es de 7 días laborando ocho horas diarias.

Riego

La técnica de riego se realiza por gravedad a través de canales hechos de forma manual con agua proveniente de dos fuentes, ya sea por el río Pintores o Río Coatepec. El agua se reparte mediante programación o tandeo, en la cual el encargado de asignar el flujo de agua al terreno avisa al dueño de la parcela para que, mediante el taponamiento del flujo con varas y piedras, el agua se desvíe hacia el terreno a regar. Estos taponamientos se realizan por todo el perímetro de la parcela para que el agua llegue al centro y extremo del terreno. El flujo de agua se mantiene durante dos o tres días, día y noche. Este mismo procedimiento se realiza 15 días después del primer riego.

Aplicación de herbicidas (primer control de malezas)

Dos meses después de la siembra, las mismas ocho personas participan en la aplicación de herbicidas; 2 acarrean agua desde la camioneta estacionada a las orillas del terreno y 6 aplican el agroquímico. En total se consumen 200 litros de agua, y los herbicidas con compuestos activos diuron y ametrina, a razón de 2 litros de cada uno diluidos en la totalidad del agua, con rendimiento para una hectárea. El agua se obtiene del mismo río y se transporta en camioneta y tambos con capacidad de 200 L. Para la segunda aplicación de herbicidas, se utilizan cuatro paquetes de Rival a las melgas o perímetro del cañal, a razón de un paquete de 50 gramos para una mochila de 20 litros.

Fertilización

Esta se realiza en una primera aplicación, a los 20 días después, mediante la aplicación de la fórmula NKP 20-10-20, con una cantidad de 12.5 bultos para la una hectárea, la aplicación la realizaron nuevamente las ocho personas, de forma manual las 8 personas en un tiempo de 4 h a 5 h. Dos meses después, se realiza una nueva aplicación de Urea, a razón de 3.5 bultos para una hectárea, esto con motivo de fertilizar las zonas donde se ve un crecimiento deficiente o menor al resto del cañal. Los bultos contienen la cantidad 50 kg de producto químico.

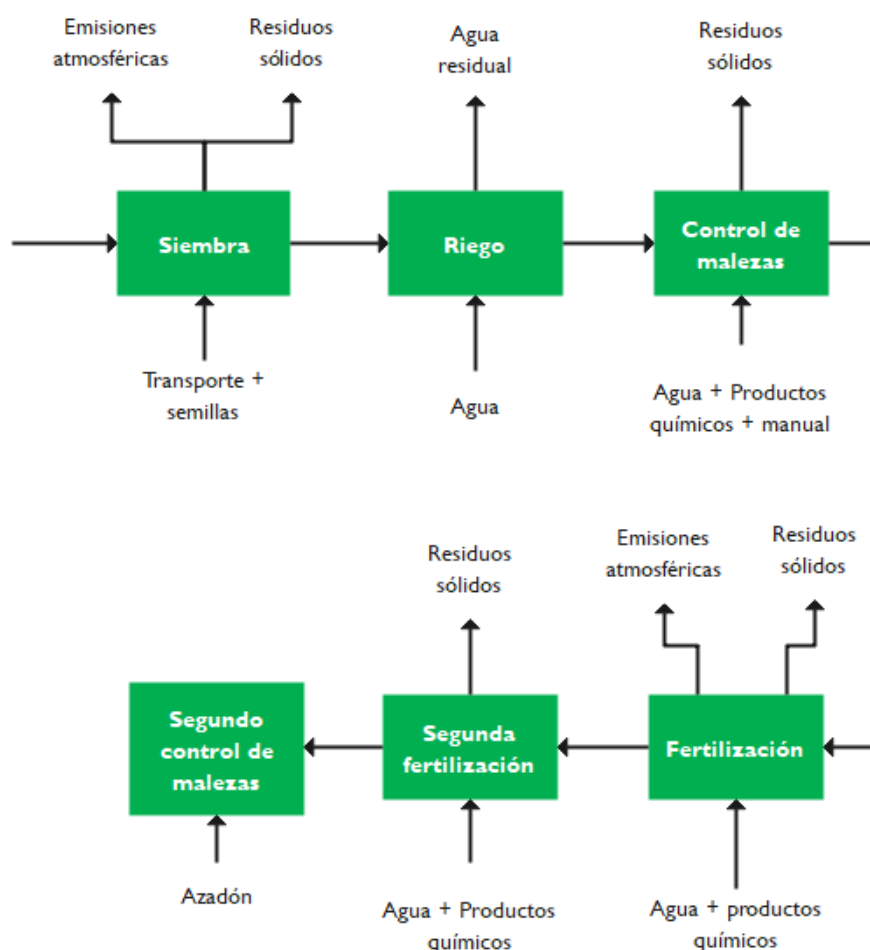


Figura 9. Diagrama de flujo de actividades intermedias durante el cultivo de caña de azúcar
Fuente: Elaboración propia

Corte y quema

Cuando la caña alcanza el contenido de azúcar adecuado para la fábrica, se realiza el doblamiento de caña para que se marquen los límites del terreno cuando la caña esté previa

a la quema. Se realiza con dos personas de manualmente. Para la quema, el ingenio mediante la realización de análisis de campo para saber si la caña está lista para ser cortada. Si se acepta los contenidos de azúcar, se procede a quemar la caña mediante el uso de cerillos y el zacate de la propia caña para iniciar el fuego, de esta manera se corre la lumbre y se logra quemar. Durante la quema, cuatro personas participan en la actividad, donde tres inician el fuego en distintas partes del terreno y uno más vigila que el fuego no se extienda a otra plantación vecina. Una vez que se quema lo seco, el fuego cesa.

Para realizar el corte, participan cinco cuadrillas de trabajadores, cada cuadrilla está conformada por seis personas que se dedican a entrar al terreno para cortar la caña, estas utilizan machetes y limas. El corte se termina en un día para una hectárea. Esta se acomoda en forma horizontal para facilitar el levantamiento de la caña con la alzada, las cuales son equipos mecánicos dedicados para colocar la caña del suelo hacia el camión transportador. Se utilizan de dos a tres alzadoras por hectárea. El tiempo dedicado para ello es de dos horas. Si el terreno va a ser utilizado para la producción de semilla no se realiza la quema. Si no que se corta la caña que se requiere se corta conforme se solicita y se alza en los camiones de transporte de forma manual. No se realiza ningún tipo de tratamiento después del corte y transporte de la caña.

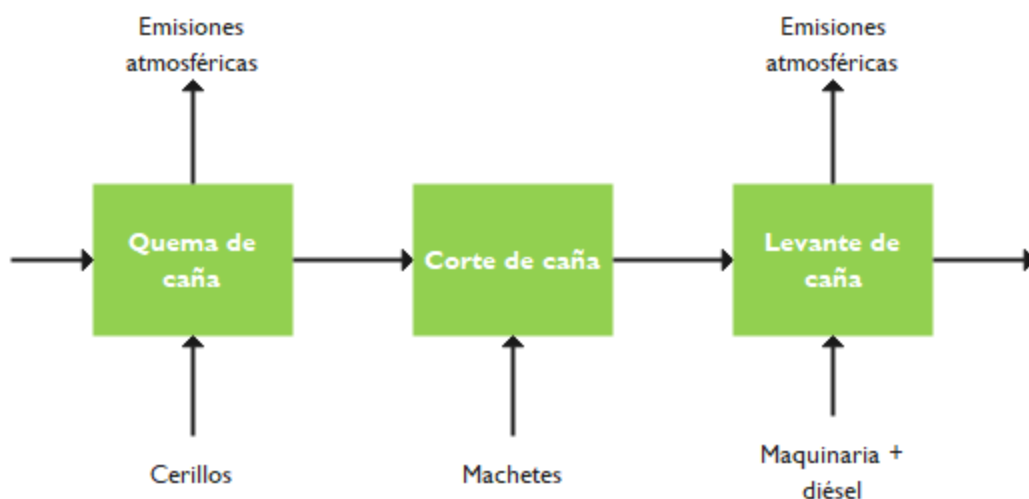


Figura 10. Diagrama de flujo de las últimas actividades de la cosecha de la caña
Fuente: Elaboración propia

10.6.2. Etapa industrial

Recepción de la caña

La materia prima para la producción del azúcar es la caña de azúcar. Se transporta desde el campo en camiones del tipo Torton y se descargan a través de dos sistemas: volcador de hilos y grúa autosustentable. En el primer caso, los camiones se colocan en un área específica donde un sistema de cables saca la caña del vehículo en una sola operación y la coloca en la mesa de alimentación número dos. Por otra parte, la grúa autosustentable extrae la caña del camión mediante un brazo extensor y la coloca directamente en la mesa alimentadora número uno, o bien, en el suelo destinado al almacenamiento temporal de la caña (De la Rosa, 2023; Vargas, 2023).

En las mesas de alimentación se lleva a cabo el lavado de la caña, que tiene el fin de retirar la mayor cantidad de tierra, piedras, polvo, metales y restos de hojas de la caña. Posteriormente la caña avanza por medio de conductores hacia dos juegos de cuchillas que sirven para disminuir el tamaño de los tallos de la caña y nivelar la altura del flujo de caña, enseguida por una desfibradora que termina de preparar la caña y la deja en un estado físico totalmente en fibras. En los juegos de cuchillas y la desfibradora, se utilizan turbinas de vapor que accionan un eje que realiza el trabajo deseado. El vapor es generado en las calderas de la planta (De la Rosa, 2023; Soto, 2023).

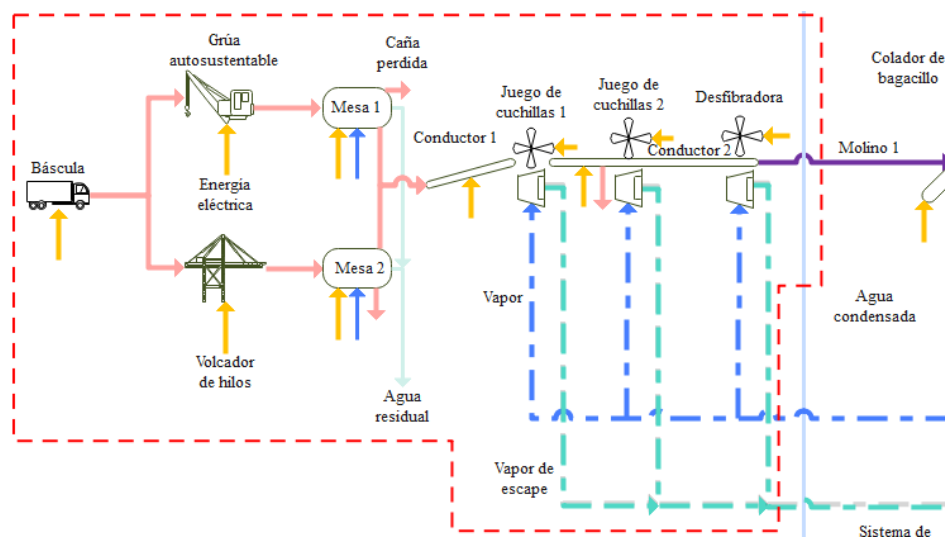


Figura 11. Flujos y equipos que conforman la etapa de recepción de materia prima.
Fuente: Elaboración propia

Molienda

Se efectúa en una serie de cinco molinos conformados por rodillos por donde pasa la caña desfibrada y se realiza la extracción del jugo. En el primer molino se extrae la mayor cantidad de jugo el cuál se le llama jugo desmenuzado. El material fibroso saliendo del molino uno, pasa hacia el molino dos, de manera sucesiva hasta el molino cinco. En el último molino se agrega agua caliente, también llamada agua de imbibición. Se utiliza para extraer la mayor cantidad de sacarosa aún disponible en el bagazo de la última extracción. El agua con sacarosa recuperada se recircula al molino cuatro, que, a su vez, el jugo extraída de esta, se recircula al molino tres, y del molino tres al molino dos. De esta manera se cumple la maceración deseada y al jugo extraído del segundo molino junto con el jugo desmenuzado se pasan a través de filtros para evitar cualquier partícula de fibra de bagazo. Ambos flujos de jugo se combinan en un tanque llamado tanque de jugo mezclado. La salida del último molino también se obtiene el material fibroso de la caña, llamado, bagazo de caña y es utilizado como combustible en las calderas de la fábrica (Landa, 2023).

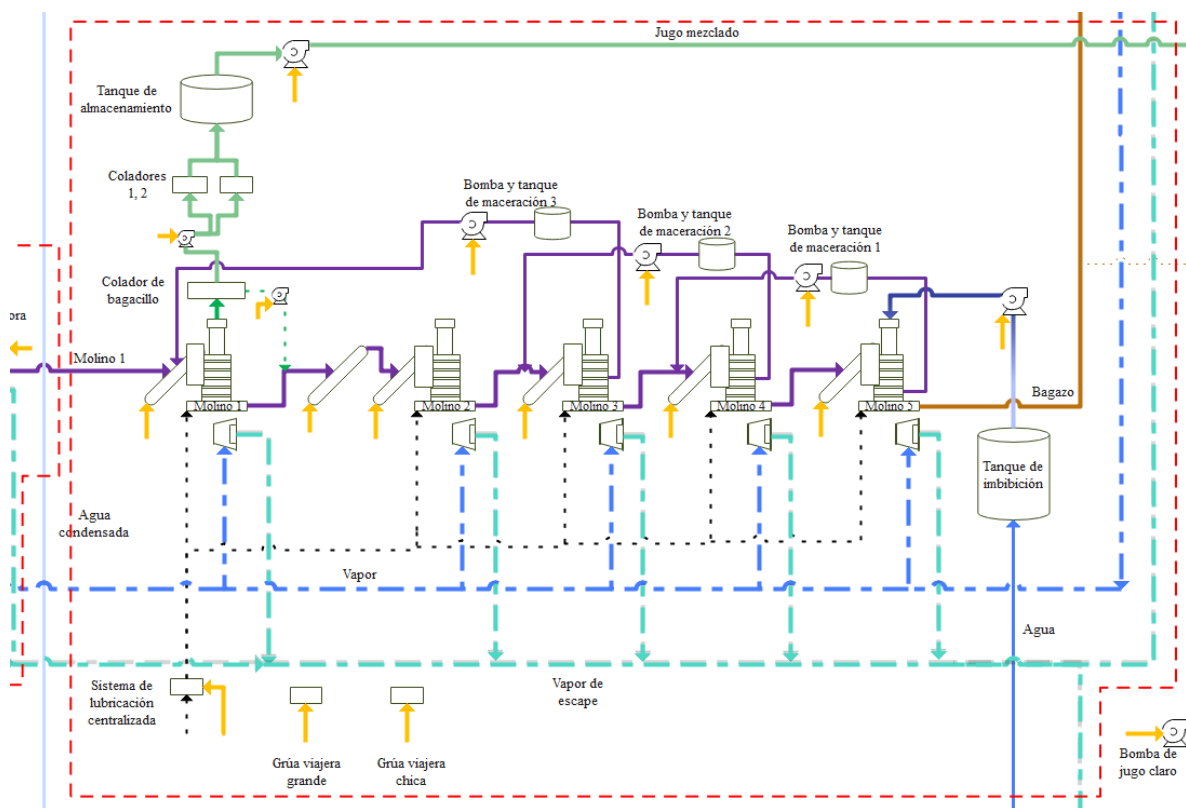


Figura 12. Flujos y equipos que conforman la etapa de molienda.
Fuente: Elaboración propia

Clarificación

Con el jugo almacenado en el tanque de jugo mezclado, se procede a pesar y preparar el jugo para la clarificación. Los pasos previos consisten en pesar el jugo extraído en básculas electrónicas. Enseguida se realiza la sulfitación mediante el calentamiento de azufre granulado en hornos. Los gases generados se mezclan con el jugo para cumplir la función de decolorar el jugo. Enseguida se agrega la cal, preparada previamente en tanques y mediante controles electrónicos, se agrega de manera automática la cantidad de mezcla para mantener el pH entre 7 y 7.5. Posteriormente el jugo se calienta en intercambiadores de calor con vapor proveniente de la etapa de evaporación y en el transcurso se agrega floculador. El calentamiento del jugo tiene la finalidad de facilitar la precipitación de las impurezas contenidas en el jugo, obteniendo así jugos más puros. El jugo ahora alcalizado se dirige a los clarificadores y mediante decantación continua se recupera el jugo claro y a través de la sedimentación ayudada por el floculador se recuperan lodos en el fondo del clarificador que posteriormente se lleva a filtración (Díaz, 2022).

Filtración del lodo

Con ayuda de la gravedad, el lodo recuperado desde el clarificador se recupera en un taque aparte y se mezcla con la fracción más fina del bagazo; este bagazo fino se obtiene con un ventilador conectado a al conductor de bagazo entre el último molino y las calderas. La mezcla resultante se hace pasar por filtros rotatorios que funcionan con motores eléctricos que generan vacío, de esta manera, el jugo recuperado o jugo filtrado, se recircula al flujo previa alcalización. La fracción sólida, torta de filtro o cachaza se envía a una tolva de almacenamiento donde sirve como dispensador para los camiones de volteo que se llevan la cachaza hacia los campos de cultivo de caña (Díaz, 2022).

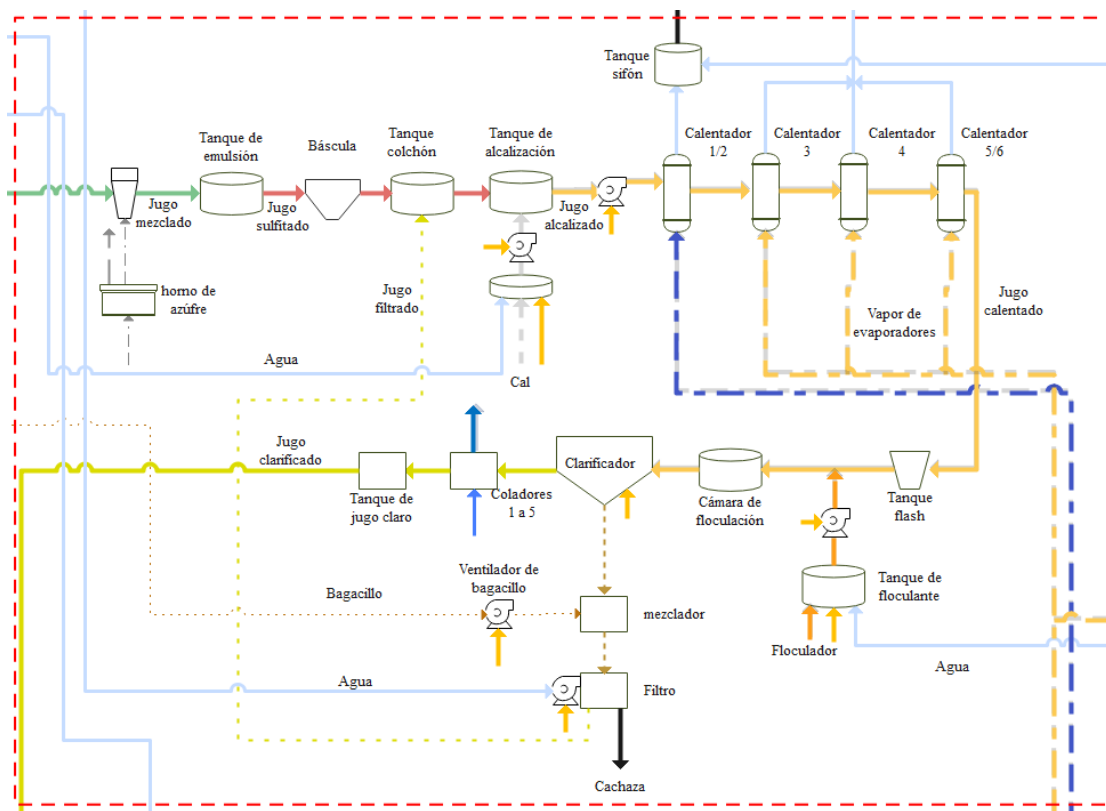


Figura 13. Flujos y equipos que conforman la etapa de clarificación y filtración.
Fuente: Elaboración propia

Evaporación

El jugo clarificado se bombea hacia un conjunto de evaporadores conectados en serie que funcionan por múltiple efecto, es decir, se requiere vapor de escape para calentar el primer evaporador y el agua contenida en el jugo a evaporar, sirve para calentar el siguiente dispositivo. Se busca concentrar la mezcla desde 16 hasta 60 brix. Como el vapor generado en el primer vaso se encuentra a una temperatura más baja que la de vapor de escape, se crea vacío para que los puntos de ebullición del agua contenida en el segundo evaporador sean más bajas. Este procedimiento se lleva a cabo a través de cinco evaporadores y al producto intermedio de interés ahora se le llama meladura o jarabe. El agua condensada de los vasos de evaporación uno, dos y tres se captan en el tanque de condensados puros, que sirve de abastecimiento de agua para las calderas. El agua condensada del vaso cuatro se capta al tanque llamado “marais”, que sirve para preparar la lechada de cal y el condensado del vaso cinco se capta al tanque sifón, que posteriormente se utiliza para el lavado en centrífugas.

Siempre se encuentra un evaporador fuera de servicio por cuestiones de mantenimiento (Díaz, 2022; Morales, 2022).

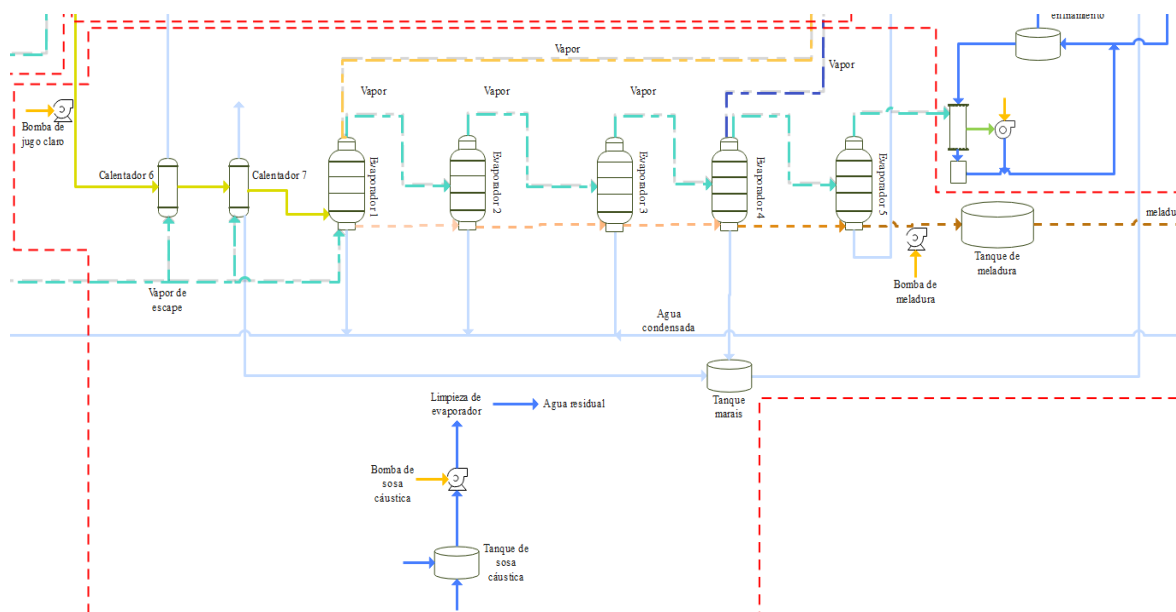


Figura 14. Flujos y equipos que conforman la etapa de evaporación.

Fuente: Elaboración propia

Cristalización

En esta etapa la meladura o jarabe se lleva a través de dispositivos similares a los evaporadores, pero, en vez de trabajar a múltiple efecto, son de efecto simple, ya que el traspasar la masa de vaso a vaso se complica por su alta viscosidad. La meladura se procesa dispositivos llamados tachos, a través de un sistema de tres etapas. En el primer tacho se agrega cristales de azúcar a la meladura ya concentrada, esto con la finalidad de promover el crecimiento del azúcar en los siguientes tachos. A partir del cristal, se mezcla con mieles de mayor o menor pureza para producir templates B y C, a su vez, estas templates sirven para producir template A, que, después del crecimiento del azúcar pasará a la centrifugación (Díaz, 2022).

Desde los tachos, se obtienen los productos intermedios templates C, A y B. La template C se deja cristalizar durante 16 horas, mientras que las templates de A y B se dejan pocas horas en los recibidores. Posteriormente, se bajan las templates y se producen azúcares y mieles A, B y C. Los azúcares B y C se mezclan con agua, las cuales sirven como semilla para la template

A. Mientras que las mieles A y B se emplean para la elaboración de templeas B y C. La miel C es llamada miel final y es un subproducto que sale de la fábrica para venta y fabricación de alcohol (Muñoz, 2022; Muñoz, 2022; Paredes, 2022).

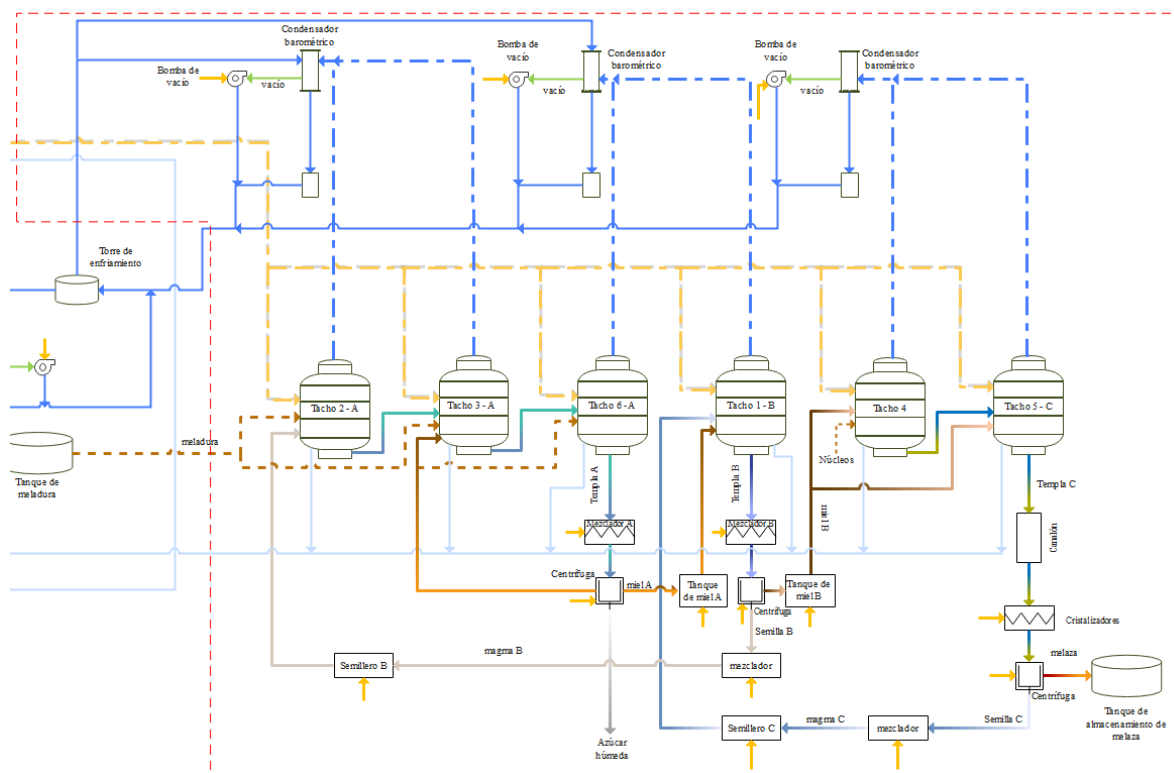


Figura 15. Flujos y equipos que conforman la etapa de cristalización y centrifugado

Fuente: Elaboración propia

Centrifugación y secado

La masa obtenida de la cocción y cristalización de la meladura, se centrifuga para separar el azúcar de las mieles que no cristalizaron. El tiempo de centrifugado para masas A es de uno a cinco minutos, para masas B es de cuatro a diez minutos y para masas de C es de diez a 45 minutos. De esta última se obtiene miel final que ya no cristaliza y se le llama melaza, está sale con pureza del 35%. La melaza se pesa y almacena en un tanque especial donde espera a ser despachada para su venta, donde se utiliza para alimento animal y producción de alcohol. El azúcar separado de las centrífugas desciende por gravedad hacia una banda transportadora que envía hacia el secador. En planta se cuenta con diez centrífugas, de las cuales cuatro son para A, tres para B y tres para C. Su funcionamiento es eléctrico y cuenta

con varias bombas de recirculación de las mieles y agua para el lavado de las telas (Romero, 2022).

El azúcar enseguida pasa por un secador tipo rotatorio que consta de un cilindro que gira sobre cojinetes y cuenta con una inclinación horizontal que facilita el movimiento del azúcar. El azúcar se alimenta continuamente por un extremo mientras que el aire caliente proveniente de un recalentador alimentado con vapor de calderas entra por el otro extremo. Al final del secado, el azúcar sale con humedad menor a 0.06%.

Empacado

El azúcar una vez seco se envasa en sacos despachados para el comercio. Para ello, se pesa en básculas electrónicas, y se realizan controles de seguridad mediante dispositivos de detección de metales para evitar distribuir azúcar contaminada. Los sacos se resguardan en un almacén que cumple las características para asegurar la inocuidad.

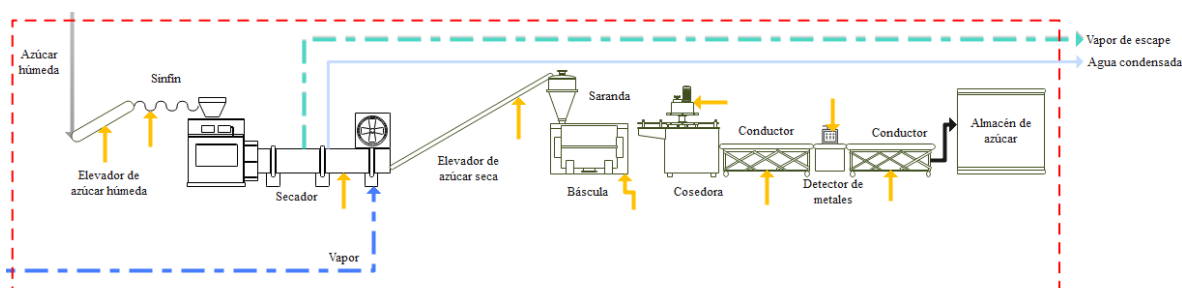


Figura 16. Flujos y equipos que conforman la etapa de secado

Fuente: Elaboración propia

10.6.3. Procesos auxiliares

Calderas

Se cuenta con dos calderas de tipo acuotubular con capacidad de generación de vapor de 35 y 55 toneladas de vapor por hora. Operan a 11.5 y 12.66 kg/cm² y a temperaturas de 260 y 240 °C respectivamente. Su fuente de alimentación se realiza mediante puertas manuales que reciben bagazo de caña como única fuente de energía que proviene del último molino. Dicho bagazo tiene humedad del 50% y parte de la producción se almacena en un patio al aire libre

que cuando es requerido, se toma nuevamente para abastecer a la caldera durante un arranque. El vapor generado se distribuye en el área de batey, molienda y planta de fuerza. En batey, se utiliza en los dispositivos juego de cuchillas uno y dos y en la desfibradora. En molienda, se utiliza en los cinco molinos disponibles. En planta de fuerza, para generar energía eléctrica con ayuda de dos plantas de energía eléctrica (Díaz, 2023).

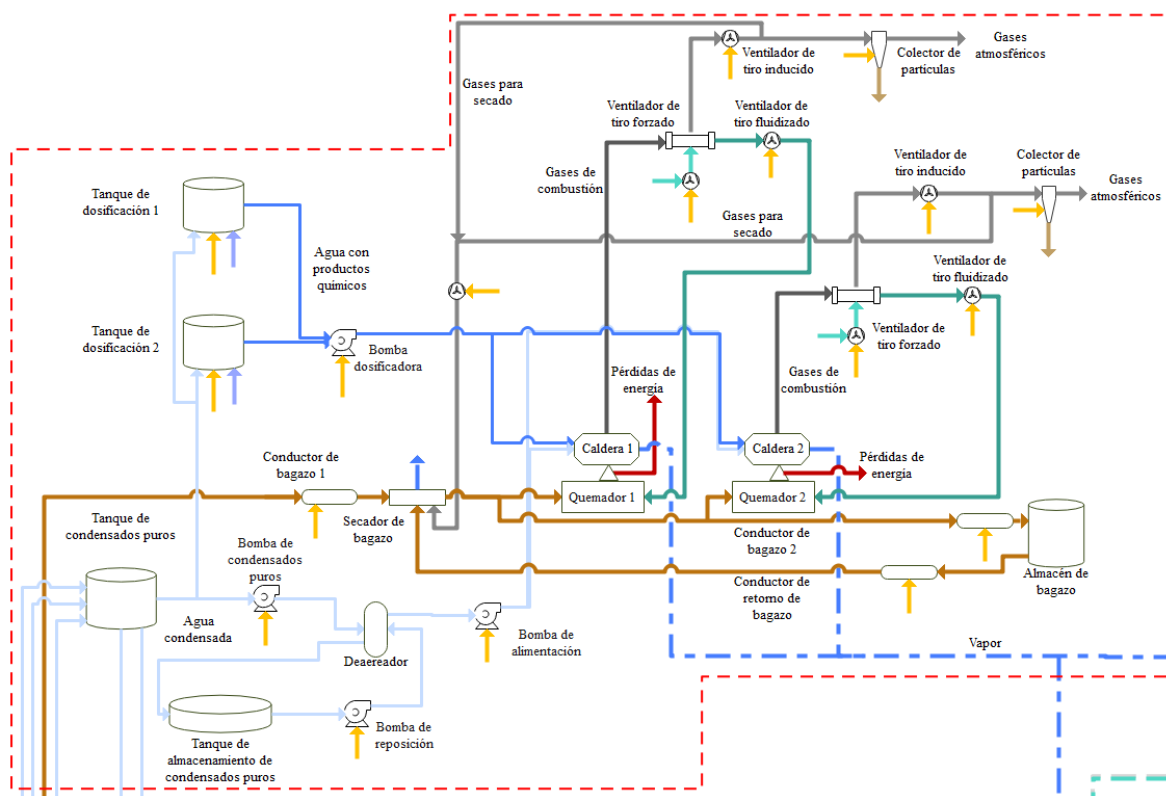


Figura 17. Flujos y equipos que conforman las calderas
Fuente: Elaboración propia

Torre de enfriamiento

Se conforman por dos torres de enfriamiento, una con capacidad de 2070 m³/h que se destina para disminuir la temperatura del agua utilizada en los equipos de molienda, bombas, calderas, generadores y centrífugas. Las temperaturas en que se recibe el agua caliente son de 60 °C y se reutiliza cuando llega a 25 °C. El agua recibida proviene del agua condensada de los vasos de evaporación, de los cristalizadores y los tachos. Se utilizan insumos como plaguicidas y biodispersantes para evitar la contaminación y crecimiento de microorganismos que puedan afectar a los procesos dentro de la fábrica. También se cuenta con una segunda

torre de enfriamiento con capacidad de 185 m³/h y el agua se utiliza para enfriar los equipos que conforman las turbinas de batey, molinos, calderas y planta de fuerza. Las torres de enfriamiento cuentan con ventiladores y motores con potencia respectiva a la capacidad de agua enfriada; la primera cuenta con un motor de ventilador de 125 HP y de 15 HP para la torre compacta.

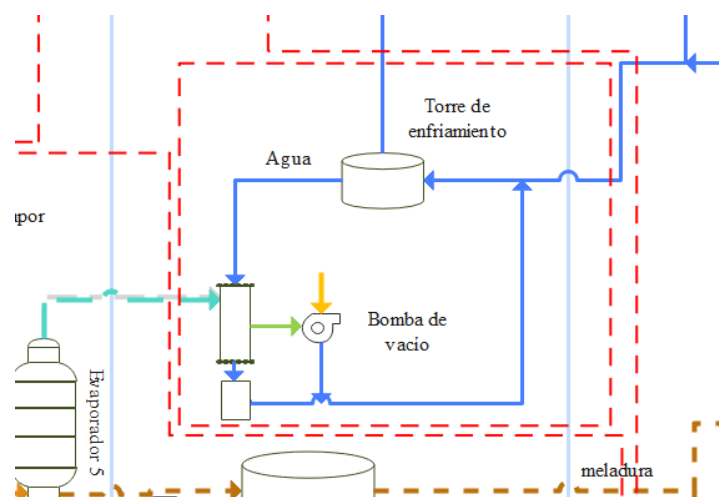


Figura 18. Flujos y equipos que conforman la torre de enfriamiento

Fuente: Elaboración propia

Planta de fuerza

Se cuenta con dos turbogeneradores de energía eléctrica que funcionan con vapor directo a 270 °C y 12.68 kg/cm² y 1340 HP cada uno. Se utilizan diversos insumos como lubricantes para las partes móviles de los motores, así como agua para el enfriamiento de los equipos, misma que se recircula a la torre de enfriamiento compacta y retorna a menor temperatura. Entre los dos equipos generados de energía eléctrica, abastecen alrededor del 70% del consumo interno, mientras que el 30% de la red eléctrica nacional (Campos, 2022; Mendiola, 2022).

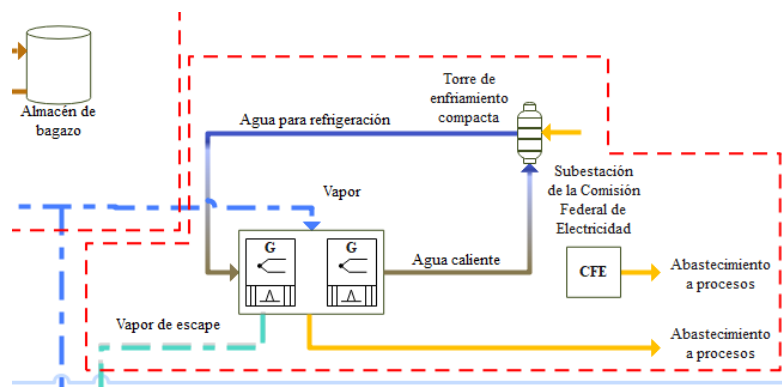


Figura 19. Flujos y equipos que conforman la planta de fuerza
Fuente: Elaboración propia

10.7. Inventario de ciclo de vida (ICV)

En este apartado se muestran los resultados de los balances de materia y energía de las actividades realizadas, así como de los insumos requeridos a lo largo de todo el sistema productivo siguiendo la secuencia real de producción. Por cuestiones prácticas y para profundizar en el análisis, en las tablas se muestran los resultados agrupados por características similares entre los flujos de entrada o salida de insumos, consumos energéticos y emisiones; los flujos principales de productos y subproductos se mantienen independientes. Las tablas completas para la etapa industrial se encuentran en el ANEXO B.

10.7.1. Etapa agrónoma

En la siguiente sección, se muestran los resultados que corresponden a las operaciones llevadas a cabo durante el cultivo de la caña. Se dividen en subsolado, rastreo, surcado, siembra, fertilización, riego, control de malezas, quema y corte. Las tablas se muestran en forma de columna iniciando por la entrada (E) o salida (S), la cantidad, su unidad y el número de control y el número de ecuación. Esta última se relaciona con la memoria de cálculo del ANEXO C.

Subsolado

Los resultados del inventario de ciclo de vida para la actividad de subsolado se muestran en la Tabla 3. Se destaca como principales herramientas la maquinaria y el consumo de combustible y los gases generados por dicha operación. Esta primer actividad coincide con

las técnicas reportadas por Duarte-Álvarez y Gonzalez-Villalba (2019) y SAGARPA (2013) que indican como primer labor importante la aplicación del subsolado.

Tabla 3. Resultados del inventario de ciclo de vida (ICV) del subsolado					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Suelo con monte	1.3470E-05	ha	1	2	E
Tractor	1.3511E-05	kg	2	4	E
Accesorio de tractor (subsolador)	4.1415E-06	kg	3	5	E
Diésel	3.2167E-05	L	4	6	E
Suelo subsolado	1.3470E-05	ha	5	3	S
Emisión atmosférica	8.3956E-05	kg CO ₂	6	7	S

Fuente: Elaboración propia

Rastreo

Para el rastreo del suelo los resultados obtenidos se observan en la Tabla 4. Como segunda actividad, se utilizan las mismas herramientas como principal análisis para el objetivo de este estudio. Lo que cambia en este caso, es el tiempo destinado para la actividad, misma que influye en las cantidades calculadas. Esta misma actividad también forma parte esencial para la preparación del terreno, tal como lo mencionan (J. Singh *et al.*, 2011; Usaborisut, 2018).

Tabla 4. Resultados del ICV del rastreo					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Suelo subsolado	1.3470E-05	ha	7	8	E
Tractor	1.3511E-05	kg	8	10	E
Accesorio de tractor (rastras)	5.2323E-06	kg	9	11	E
Diésel	3.2167E-05	L	10	12	E
Suelo barbechado	1.3470E-05	ha	11	9	S
Emisión atmosférica	8.3956E-05	kg CO ₂	12	13	S

Fuente: Elaboración propia

Surcado

Los resultados del ICV para el surcado del terreno se muestra en la Tabla 5. Al igual que en las operaciones anteriores, los principales insumos son el diésel y la maquinaria especializada para la creación de los surcos. Esta actividad es esencial ya que, dependiendo de la profundidad hecha, tendrá efectos en la germinación de la semilla, tal cual lo menciona (S. Singh *et al.*, 2017).

Tabla 5. Resultados del ICV del surcado					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Suelo rastreado	1.3470E-05	ha	13	14	E
Tractor	1.3511E-05	kg	14	16	E
Accesorio de tractor (roturador)	4.3056E-07	kg	15	17	E
Diésel	3.2167E-05	L	16	18	E
Suelo surcado	1.3470E-05	ha	17	15	S
Emisión atmosférica	8.3956E-05	kg CO ₂	18	19	S

Fuente: Elaboración propia

Siembra

Los resultados del inventario de la siembra se muestran en la Tabla 6. En este caso el principal insumo son las semillas y azadones para la siembra manual. La técnica utilizada en el sitio de estudio coincide con las técnicas aplicadas en México (SAGARPA, 2013) y Centroamérica (Duarte-Álvarez y Gonzalez-Villalba, 2019), sin embargo, difieren a las utilizadas en otras regiones del mundo, donde se realiza de forma mecanizada (Nalawade *et al.*, 2018).

Tabla 6. Resultados del ICV de la siembra					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Suelo subsolado	1.3470E-05	ha	19	20	E
Semillas	6.9793E-06	ton	20	23	E
Agua	1.2006E-06	m ³	21	24	E
Transporte	1.1098E-06	tonkm	22	25	E
Herramientas de acero	3.8955E-08	kg	23	22	E
Suelo sembrado	1.3470E-05	ha	24	21	S

Fuente: Elaboración propia

Fertilización

La información que se presenta en la Tabla 7 corresponde a los resultados del inventario de ciclo de vida de la fertilización. En esta se resalta el consumo de los fertilizantes nitrogenados, fosfatados y de potasio como principal foco de contaminación, ya que esta puede escurrir fuera de los campos de cultivo si se aplica de manera inadecuada, tal como lo remarca (Cheesman, 2004), uno de los primeros autores en abordar de manera completa, los peligros que representa el uso de productos agroquímicos en el cultivo de caña y (Bordonal *et al.*, 2018; Cardoso *et al.*, 2018) en años más recientes.

Tabla 7. Resultados del ICV de la fertilización					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Suelo sembrado	1.3470E-05	ha	25	29	E
Agua	5.0967E-02	m ³	26	32	E
Fertilizante 20-10-20	8.0418E-04	kg	27	36	E
N (nitrógeno)	1.6084E-04	kg	28	36	E
P ₂ O ₅ (pentóxido de fósforo)	8.0418E-05	kg	29	36	E
K ₂ O (óxido de potasio)	1.6084E-04	kg	30	36	E
Urea	2.2976E-04	kg	31	36	E
Transporte	3.2710E-03	tonkm	32	33	E
Amoniaco	1.4892E-06	mg	33	34	S
Monóxido de dinitrógeno	1.9266E-07	mg	34	34	S
Cadmio	5.4595E-06	mg	35	35	S
Cromo	2.6831E-03	mg	36	35	S
Mercurio	9.3225E-08	mg	37	35	S
Plomo	3.3838E-05	mg	38	35	S
Zinc	3.2319E-03	mg	39	35	S
Suelo fertilizado	1.3470E-05	ha	40	30	S

Fuente: Elaboración propia

Riego

Los resultados del inventario de ciclo de vida del riego se muestran en la Tabla 8. En esta etapa, el principal factor a destacar es el consumo del agua, ya que en esta se vuelve importante la cantidad de agua a utilizar porque representa un recurso vital para la vida cotidiana de los pobladores. Mismo que está relacionado con la técnica de riego como han reportado diversos autores, donde analizan el rendimiento obtenido respecto al método utilizado (Arguedas Sánchez, 2018; Gutiérrez *et al.*, 2016; SAGARPA, 2013).

Tabla 8. Resultados del ICV del riego					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Suelo sembrado	1.3470E-05	ha	41	26	E
Agua riego canales	5.0955E-02	m ³	42	28	E
Agua de lluvia	1.2006E-05	m ³	43	28	E
Suelo regado	1.3470E-05	ha	44	27	S

Fuente: Elaboración propia

Control de malezas

Los resultados del control de malezas se muestran en la Tabla 9. En esta actividad, al igual que en la fertilización, se destaca el número de productos químicos empleados para el control

de plantas no deseadas en los campos de cultivo. Tal como lo menciona (Cheesman, 2004) en esta etapa es indispensable contar con el control adecuado de la cantidad aplicada para no tener filtraciones de herbicidas a cuerpos de agua potable.

Tabla 9. Resultados del ICV para el control de malezas					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Suelo fertilizado	1.3470E-05	ha	45	36	E
Diurón	9.9994E-07	kg	46	38	E
Ametrina	2.2976E-07	L	47	38	E
Rival	6.2496E-08	kg	48	38	E
Agua	2.5734E-07	m ³	49	39	E
Transporte	3.8870E-06	tonkm	50	40	E
Glifosato (al aire)	4.7170E-08	kg	51	41	S
Atrazina (al aire)	8.5159E-09	kg	52	41	S
2-4 diclorofenoxiacético (al aire)	6.4123E-09	kg	53	41	S
Glifosato (al agua)	5.2408E-09	kg	54	42	S
Atrazina (al agua)	9.4618E-10	kg	55	42	S
2-4 diclorofenoxiacético (al agua)	7.1256E-10	kg	56	42	S
Glifosato (al suelo)	4.7170E-07	kg	57	43	S
Atrazina (al suelo)	8.5159E-08	kg	58	43	S
2-4 diclorofenoxiacético (al suelo)	6.4137E-08	kg	59	43	S
Suelo controlado	1.3470E-05	ha	60	37	S

Fuente: Elaboración propia

Quema y corte

Una de las operaciones de mayor preocupación se refiere a la quema de la caña. En la Tabla 10 se muestran los resultados del inventario para la etapa de quema y corte. En ella se aprecian los parámetros considerados para este estudio donde se tomaron en cuenta los gases efecto invernadero que se generan por la quema de la caña y las herramientas necesarias para el corte y colocación en los camiones de transporte. Es importante recalcar las emisiones ya que son promotores del calentamiento global, y desde los esfuerzos de (Mugica-Álvarez, 2016) por medir la contaminación y factores de emisión hasta los trabajos de (Arroniz y Barroso, 2013; Herrera *et al.*, 2015; Oanh *et al.*, 2018b) que toman como relevante la quema de caña por los impactos al aire que representa.

Tabla 10. Resultados del ICV de quema y corte					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Suelo controlado	1.3470E-05	ha	61	44	E
Alzadora (maquinaria)	1.3511E-05	kg	62	47	E
Diésel	3.2167E-05	L	63	48	E
Emisiones atmosféricas (diésel)	8.3956E-05	kg CO ₂	64	49	S
Emisión de CO ₂	3.7180E-04	ton CO ₂	65	50	S
Emisión de CO	5.9057E-06	ton CO	66	50	S
Emisión de CH ₄	5.2623E-07	ton CH ₄	67	50	S
Emisión de PM ₁₀	4.1593E-07	ton PM ₁₀	68	50	S
Emisión de PM _{2.5}	2.7346E-07	ton PM _{2.5}	69	50	S
Emisión de CN	1.6315E-07	ton CN	70	50	S
Emisión de OC	2.5507E-07	ton OC	71	50	S
Caña de azúcar	1.0469E-03	ton	72	45	S

Fuente: Elaboración propia

10.7.2. Etapa industrial

En la siguiente sección se muestran los resultados que corresponden a las operaciones físicas y químicas que integran la etapa industrial. Se dividen en la recepción de la materia prima, molienda, clarificación, evaporación, cristalización, secado, empaçado, calderas y planta de fuerza y cada una de ellas a su vez incluye los resultados individuales de cada equipo mecánico que la conforman. En este caso, la tabla solo muestra el inventario resumido, en el ANEXO B, se encuentran las tablas completas con número de control (NC), número de ecuación (NC) y flujo de entrada o salida (E/S).

Recepción de la materia prima

En la Tabla 11 se muestran los flujos de materia y energía que participaron durante el funcionamiento y mantenimiento de la grúa autosustentable. El flujo principal de entrada es caña proveniente del campo, de la cual el consumo de energía el consumo de energía el cual tiene relación de 1.57 kWh consumido por tonelada de caña descargada. Es importante destacar que la productividad de la grúa se encuentra por arriba a lo reportado por Díaz y Gradaille (2019) que mencionan descargar 44 ton/h mientras que la del presente estudio, descarga hasta 130 ton/h.

Tabla 11. Resultados del ICV de la grúa autosustentable		
Insumo	Cantidad	Unidad
Caña de entrada	3.4555E-04	ton
Energía eléctrica	5.4587E-04	kWh
Electrodos	4.4256E-07	kg
Emisiones por electrodos	3.9312E-07	g
Cables de acero	2.7574E-08	kg
Gas LP	1.4181E-07	kg
Oxígeno	1.3528E-06	kg
Transporte	2.3128E-05	tonkm
Caña de salida	3.4555E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Para el volcador de hilos, los resultados se muestran en la Tabla 12. En este caso, el factor de consumo de energía fue de 0.74 kWh por tonelada de caña descargada, siendo más eficiente respecto a la grúa autosustentable. Además, en un régimen de trabajo continuo, llega a transferir hasta 214 ton/h, siendo aún mayor que la grúa y a lo reportado por Díaz y Gradaille (2019). Cabe resaltar que, en otras fábricas, se llegaron a registrar hasta 27 minutos para la descarga de un camión con máximo 25 toneladas de caña, mientras que en el presente trabajo lo realizan en 7 minutos, debido a que el proceso de transferencia lo mantienen en perfecta organización. Sin embargo, estos tiempos aún pueden ser disminuidos.

Tabla 12. Resultados del ICV para el volcador de hilos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Caña de entrada	5.7780E-04	ton
Energía eléctrica	4.2988E-04	kWh
Grasas y aceites	1.4128E-06	kg
Cables	5.8388E-07	kg
Electrodos	3.9078E-09	kg
Emisiones por electrodos	2.2959E-09	g
Oxígeno	5.3051E-08	kg
Transporte	1.9167E-03	kgkm
Caña de salida	5.7780E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 13 se muestran los flujos de materia y energía consumidos durante la operación de las mesas de alimentación uno y dos. En estos equipos se recibe la caña que el volcador de hilos y la grúa autosustentable descargan desde los camiones. Se puede distinguir que esta operación es una de las fuentes principales de consumo de agua ($4.43 \text{ m}^3/\text{ton}$ de caña) desde

una fuente hídrica directa, sin embargo, se encuentra en el rango de 1.35 a 6.23 m³/ton caña reportado por Vega, R. (2016). También es remarcable los principales componentes del agua residual, como la DBO y las grasas y aceites emitidas, así como la caña que se pierde por derrame de las mesas del 4%.

Tabla 13. Resultados del ICV para las mesas de alimentación uno y dos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Caña de entrada	9.2336E-04	ton
Energía eléctrica	1.0235E-03	kWh
Agua	3.9292E-03	m ³
Agua residual	3.9292E-03	m ³
Grasas y aceites en agua residual	3.8146E-08	ton
DBO	6.5446E-07	ton
Transporte	8.1642E-06	kgkm
Caña de salida	8.8666E-04	ton
Caña perdida	3.6693E-05	ton

Fuente: Elaboración propia

Para el primer conductor de caña, los resultados se muestran en la Tabla 14. En este caso, solo se detectó el consumo de energía eléctrica para su funcionamiento, aunque en un futuro análisis se podría detectar las cantidades de aceites o lubricantes consumidas durante su mantenimiento, tal cual lo recomienda Smith y Mobley (2003).

Tabla 14. Resultados del ICV para el conductor de caña uno		
Insumo	Cantidad	Unidad
Caña de entrada	8.8666E-04	ton
Energía eléctrica	8.5293E-04	kWh
Caña de salida	8.8666E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los flujos de materia y energía que participaron durante el funcionamiento del juego de cuchillas número uno, se muestran en la Tabla 15. Este equipo consumió agua para enfriamiento, mismo que al estar en contacto directo con la maquinaria y sus componentes internos, no es recirculada al sistema. Otro aspecto importante es que es el primer equipo que consume energía en forma de vapor generado en las calderas y los gases de escape son utilizados en equipos del área de elaboración (evaporación). La configuración actual de la empresa coincide el estudio publicado por Tibaquirá *et al.*, (2022), donde

reestructuran los flujos de vapor hacia el consumo en otras áreas intermedias del proceso para disminuir los consumos de vapor directo, beneficiando la generación y venta de energía eléctrica.

Tabla 15. Resultados del ICV para el juego de cuchillas uno		
Insumo	Cantidad	Unidad
Caña de entrada	8.8666E-04	ton
Agua de enfriamiento	2.3407E-05	m ³
Agua de enfriamiento saliente	2.3407E-05	m ³
Energía eléctrica	1.3647E-05	kWh
Electrodos	1.2044E-07	kg
Emisiones de electrodos	1.1110E-08	g
Transporte	3.8989E-05	kgkm
Vapor	8.1225E-02	MJ
Vapor de escape	7.0338E-02	MJ
Caña de salida	8.8666E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 16 se muestran los resultados de los flujos de materia y energía utilizados durante la operación del juego de cuchillas número dos. Este presenta flujos similares al juego de cuchillas uno, ya que se encuentran en serie y tienen las mismas características de funcionamiento. Sin embargo, hay excepciones ya que, durante la etapa de mantenimiento, las cantidades de electrodos consumidos y, por tanto, las emisiones atmosféricas, fueron las únicas diferencias. Es importante mencionar que para el sistema se mantenga libre de fugas, se deben establecer medidas correctoras como las recomendadas por Astrom (2005), el cual también menciona insumos para el mantenimiento de los dispositivos de vapor.

Tabla 16. Resultados del ICV para el juego de cuchillas dos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Caña de entrada	8.8666E-04	ton
Energía eléctrica	1.3647E-05	kWh
Agua de enfriamiento	2.3407E-05	m ³
Agua residual	2.3407E-05	m ³
Electrodo	1.3677E-08	kg
Emisiones de electrodos	7.5773E-09	g
Transporte	7.9658E-05	kgkm
Vapor	8.1225E-02	MJ

Tabla 16. Resultados del ICV para el juego de cuchillas dos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Vapor de escape	7.0338E-02	MJ
Caña de salida	8.8666E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Similar al conductor de caña uno, en la Tabla 17 se muestran los flujos participantes durante la operación del conductor de caña número dos. Nuevamente no se detectaron insumos de mantenimiento, por lo que es un área de oportunidad para asignar de manera precisa los insumos exactos para este equipo, como el formato de fallos en equipos que presenta Gasca et al., (2017) el cuál puede servir como guía para perfeccionar la hoja de entrega actual de materiales en almacén.

Tabla 17. Resultados del ICV para el conductor de caña dos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Caña de entrada	8.8666E-04	ton
Energía eléctrica	3.0705E-04	kWh
Caña de salida	8.8666E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la desfibradora se visualizan en la Tabla 18 **Ecuación 18**. Este equipo es el tercero que requiere energía en forma de vapor para su funcionamiento, y en este caso, el consumo es mayor, ya que debe ejercer presión para aplastar la caña y dejarla en forma de fibras. Por otra parte, se detectaron los consumos de grasas y aceites, electrodos de soldadura y sus emisiones atmosféricas, así como la caña que se pierde por salpicadura a los alrededores de la banda transportadora, siendo esta del 0.02%. El porcentaje de pérdida total de caña suma 4% y conforme a lo mencionado por Correa y García (2014) es importante controlar dichas pérdidas, ya que, al corregir tales irregularidades, la eficiencia del sistema aumentaría.

Tabla 18. Resultados del ICV para la desfibradora		
Insumo	Cantidad	Unidad
Caña	8.8666E-04	ton
Grasas y aceites	2.2887E-07	kg
Electrodos	2.2470E-08	kg
Emisión de electrodos	1.9316E-08	g
Gas LP	6.0880E-08	kg
Transporte	3.3909E-04	kgkm

Tabla 18. Resultados del ICV para la desfibradora		
Insumo	Cantidad	Unidad
Vapor	1.6422E-01	MJ
Vapor de escape	1.4221E-01	MJ
Caña de salida	8.8642E-04	ton
Caña perdida	2.4107E-07	ton

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 19 se resumen todos los flujos de materia que no se pudieron adjudicar a ningún equipo, pero, que, por estar registrados como consumo en el área de recepción de la materia prima, se incluyeron. En este caso, se remarca el consumo de grasas y aceites y electrodos, sus respectivas emisiones atmosféricas y el consumo de cal y cemento para labores de mantenimiento al piso del área de trabajo. También se observa el consumo de cal para uso fungicida y bactericida, utilizado después de que se realiza una actividad de mantenimiento a algún equipo y, por consiguiente, la cantidad de masa por kilómetro recorrido aumentó respecto a los procesos anteriores.

Tabla 19. Resultados del ICV para los servicios en general		
Insumo	Cantidad	Unidad
Grasas y aceites	2.7177E-06	kg
Electrodos	1.3522E-06	kg
Emisiones de electrodos	2.1511E-05	g
Cal	3.9078E-07	kg
Cemento	8.4996E-06	kg
Gas LP	8.0411E-07	kg
Oxígeno	5.9710E-06	kg
Transporte	1.5752E-04	kgkm

Fuente: Elaboración propia

Molienda

Los resultados del molino uno, se muestran en la Tabla 20. Se puede observar que se requiere agua para enfriamiento del mecanismo interno que sale como agua residual y se descarga directo a la naturaleza. Nuevamente se requiere vapor para mover los rodillos que aplastan la caña y el vapor de escape generado se recupera para aprovechamiento en procesos de elaboración como se mencionó anteriormente. En este molino se obtiene un primer jugo que se separa del bagazo y es 10% mayor al reportado por López *et al.*, (2017). Cabe destacar que depende de factores propios requeridos por el sistema, tipo de caña a moler y potencias

requeridas en cada caso de estudio. El bagazo resultante pasa a los siguientes molinos para recuperar aún más la sacarosa contenida y contiene una humedad cercana al 60% (Hugot, 1984).

Tabla 20. Resultados del ICV para el molino uno		
Insumo	Cantidad	Unidad
Caña de entrada	8.8651E-04	ton
Energía eléctrica	3.2604E-04	kWh
Agua de enfriamiento	3.5519E-05	ton
Agua residual	3.4421E-05	ton
Electrodos	3.3217E-08	kg
Emisiones por electrodos	2.9745E-08	g
Oxígeno	2.6526E-11	ton
Gas LP	5.9087E-11	ton
Transporte	1.0649E-01	kgkm
Vapor	8.1399E-02	MJ
Vapor de escape	7.0338E-02	MJ
Jugo de salida	6.0405E-04	ton
Bagazo de salida	2.8246E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Para el molino dos, en la Tabla 21 se muestran los flujos de materia y energía consumidos. Aquí se recibe el bagazo proveniente del molino uno y el jugo de maceración del molino tres como flujos principales y se denota nuevamente el uso de energía en forma de vapor de agua, misma que al ser utilizada, el vapor de escape se aprovecha para utilizarlo en los evaporadores. Es importante señalar el uso de agua para enfriamiento como consumo constante y sin recirculación y el uso de electrodos y la generación de sus emisiones para este caso. También, se debe considerar el uso de agua caliente para la maceración, ya que de acuerdo con Kent (2011) una temperatura mayor, implica un contenido menor de humedad del bagazo que sale del molino.

Tabla 21. Resultados del ICV para el molino dos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Bagazo de entrada	2.8246E-04	ton
Jugo de maceración	1.8797E-04	ton
Energía eléctrica	8.5598E-04	kWh
Agua de enfriamiento	3.8748E-05	ton

Tabla 21. Resultados del ICV para el molino dos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Agua residual	3.8748E-05	ton
Electrodos	3.9078E-09	kg
Emisiones por electrodos	3.3881E-09	g
Oxígeno	2.6526E-11	ton
Transporte	9.2881E-03	kgkm
Vapor	8.8799E-02	MJ
Vapor de escape	7.6896E-02	MJ
Jugo de salida	1.8797E-04	ton
Bagazo de salida	2.8246E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Para el molino tres, los resultados de los flujos de materia y energía se presentan en la Tabla 22. En este molino nuevamente se utiliza agua para enfriamiento que es descargado a la naturaleza. Así mismo, el consumo de vapor y su posterior recuperación de energía en la etapa de elaboración. En este caso no se detectaron las emisiones generadas por electrodos, pero si se consideró el transporte utilizado por la adquisición de otros insumos de mantenimiento.

Tabla 22. Resultados del ICV para el molino tres		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo de maceración	1.8797E-04	ton
Bagazo de entrada	2.8246E-04	ton
Energía eléctrica	5.2783E-04	kWh
Agua de enfriamiento	6.7080E-05	ton
Agua residual	6.6717E-05	ton
Transporte	2.0225E-07	tonkm
Vapor	1.5373E-01	MJ
Vapor de escape	1.3312E-01	MJ
Agua de imbibición	1.8797E-04	ton
Bagazo de salida	2.8246E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 23 se muestran los flujos de materia y energía para el molino cuatro. Tal como en los casos anteriores, se enfatiza en el uso de energía contenida en el vapor de agua y su reaprovechamiento en los evaporadores. Se consideraron insumos de mantenimiento como

el uso de electrodos y las emisiones atmosféricas producidas, así como el transporte demandados por el suministro de los insumos.

Tabla 23. Resultados del ICV para el molino cuatro		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo de maceración	1.8797E-04	ton
Bagazo de entrada	2.8246E-04	ton
Energía eléctrica	5.9067E-04	kWh
Agua de enfriamiento	6.7080E-05	ton
Agua residual	2.3163E-06	ton
Electrodos	1.5241E-08	kg
Emisiones por electrodos	1.1333E-08	g
Oxígeno	2.6526E-11	ton
Transporte	8.9460E-08	tonkm
Vapor	1.5373E-01	MJ
Vapor de escape	1.3312E-01	MJ
Agua de imbibición	1.8797E-04	ton
Bagazo de salida	2.8246E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Los resultados conformados para el molino cinco se muestran en la Tabla 24. Nuevamente se remarca el consumo de energía en forma de vapor y este está en el rango de la energía consumida en los molinos anteriores. En este último, se genera el bagazo que será utilizado como fuente de energía para las calderas, sin embargo, aun sale con 50% de humedad, pero reemplaza al combustóleo, creando así un ciclo donde un residuo se vuelve de alto interés por los volúmenes que se genera dentro de la fábrica. No obstante, si no se consume un combustible fósil, con el bagazo se generan emisiones de partículas volantes que deben ser tratadas con igual seriedad como cualquier otra emisión y deben ser estudiadas a profundidad para el caso de estudio presente (Sánchez Castro *et al.*, 2013).

Tabla 24. Resultados del ICV para el molino cinco		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo de maceración	1.5310E-04	ton
Bagazo de entrada	2.8246E-04	ton
Energía eléctrica	5.2936E-04	kWh
Agua de enfriamiento	3.5519E-05	ton

Tabla 24. Resultados del ICV para el molino cinco		
Insumo	Cantidad	Unidad
Agua residual	3.5397E-05	ton
Electrodos	2.9309E-08	kg
Emisiones por electrodos	2.6554E-08	g
Oxígeno	1.3263E-10	ton
Transporte	3.0566E-06	tonkm
Vapor	8.1399E-02	MJ
Vapor de escape	7.0488E-02	MJ
Agua de imbibición	1.8797E-04	ton
Bagazo de salida	2.4759E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Los insumos utilizados en el tanque de jugo mezclado se muestran en la Tabla 25. En este equipo se reciben los jugos provenientes de los molinos uno y dos. Entre los principales insumos de mantenimiento se encuentran los tornillos y electrodos, y ligado a ellos, el transporte generado para su suministro a la planta. Nuevamente se sugiere agregar detalles específicos a los formatos de almacén para un mejor control de los equipos que requieren insumos para reparación (Gasca *et al.*, 2017; Smith y Mobley, 2003).

Tabla 25. Resultados del ICV para el tanque de jugo mezclado		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo de molino 1	6.0405E-04	ton
Jugo de molino 2	1.8797E-04	ton
Energía eléctrica	1.4946E-03	kWh
Tornillos	2.5269E-08	ton
Electrodos	5.8618E-09	kg
Emisiones por electrodos	4.0642E-09	g
Transporte	2.6519E-06	tonkm
Jugo mezclado	7.9202E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 26 se muestran los flujos de materia y energía que conforman al sistema de lubricación de los molinos. El insumo principal en este caso son los aceites que se dosifican al sistema de movimiento de los molinos. Sin embargo, el transporte se vuelve importante por las largas distancias recorridas para la adquisición de cada material requerido.

Tabla 26. Resultados del ICV para el sistema de lubricación de los molinos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Grasas y aceites	1.8388E-09	ton
Tornillos	7.0192E-10	ton
Oxígeno	7.9577E-11	ton
Transporte	1.5409E-06	tonkm

Fuente: Elaboración propia

Para el último equipo del área de molienda, los resultados se muestran en la Tabla 27. Este es un caso similar al sistema de lubricación de molinos, ya que solo participan insumos de mantenimiento, pero se contabilizan las emisiones por la utilización de electrodos.

Tabla 27. Resultados del ICV para el sistema de coladores de jugo		
Insumo	Cantidad	Unidad
Tornillos	7.0192E-10	ton
Electrodos	5.8618E-09	kg
Emisión por electrodos	5.6976E-09	g
Oxígeno	5.3051E-11	ton
Transporte	2.3671E-06	tonkm

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 28 se resumen todos los flujos de materia que no se pudieron adjudicar a ningún equipo, pero se incluyeron ya que forman parte de las etapas de mantenimiento al área de molienda. En este caso, el consumo de grasas y aceites y electrodos, sus respectivas emisiones atmosféricas. En esta tabla se vuelve importante la cantidad de transporte utilizado, ya que el consumo de insumos de mantenimiento demanda la adquisición constante de materiales y por ello el transporte aumenta respecto a los equipos anteriores. Sin embargo, es un área de oportunidad para asignar con mayor exactitud los insumos requeridos para cada equipo dentro del área de molinos y de esta manera sirvan para futuros análisis (Marqués *et al.*, 2017).

Tabla 28. Resultados del ICV para los servicios generales		
Insumo	Cantidad	Unidad
Placas de acero	1.0165E-08	ton
Tornillos	4.5976E-07	ton
Grasas y aceites	1.7689E-07	ton
Electrodos	2.0509E-06	kg
Emisiones por electrodos	1.6705E-06	g

Tabla 28. Resultados del ICV para los servicios generales		
Insumo	Cantidad	Unidad
Oxígeno	2.2295E-09	ton
Gas LP	4.2426E-10	ton
Oxido de calcio	6.9950E-10	ton
Transporte	1.4478E-04	tonkm

Fuente: Elaboración propia

Calderas

Para el primer conductor de bagazo, los resultados del inventario se muestran en la Tabla 29. En este equipo se denota el consumo de insumos de acero como tornillos y arandelas para el mantenimiento, en este sentido se encontró que las distancias de transporte fueron significativas debido a que los sitios de adquisición provenían desde sitios a más de 200 km con frecuencias de suministro arriba de tres por zafra. La importancia radica a los impactos ambientales vinculados al transporte demandado tal como lo mencionan Browne *et al.* (2005); Farkavcova *et al.* (2018). Como requerimientos para la operación se requiere energía eléctrica.

Tabla 29. Resultados del ICV para el conductor de bagazo uno		
Insumo	Cantidad	Unidad
Bagazo entrante	2.9761E-04	ton
Energía eléctrica	3.8959E-04	kWh
Insumos de acero	1.6077E-10	ton
Transporte	6.4713E-07	tonkm
Bagazo saliente	2.9761E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Para el segundo conductor de bagazo, los resultados del inventario se muestran en la Tabla 30, este dispositivo tiene un consumo de insumos similar al conductor uno, por lo tanto, los principales insumos fueron energía eléctrica y tornillería para el mantenimiento.

Tabla 30. Resultados del ICV para el conductor de bagazo dos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Bagazo	2.9761E-04	ton
Energía eléctrica	6.7817E-04	kWh
Insumos de acero	1.6241E-10	ton
Transporte	1.3511E-06	tonkm

Tabla 30. Resultados del ICV para el conductor de bagazo dos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Bagazo	2.9761E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 31 se muestran los flujos de materia y energía para el secador de bagazo. Este dispositivo recibe una cantidad mínima de energía recuperada antes de la emisión de los gases de combustión que se recirculan hacia el área de calderas para reducir de 1 a 2% la humedad del bagazo. Cabe destacar que existe la oportunidad de mejorar el actual secador de bagazo de acuerdo con las recomendaciones presentadas por Miranda et al. (2021); Pellegrini y de Oliveira Jr (2007); Sosa-Arno *et al.* (2006); Sosa-Arno y Nebra (2009) o bien, implementar un sistema propio que aproveche la energía residual de los gases de combustión como el creado por Franck-Colombes *et al.*, (2010), el cuál logra disminuir de 50 a 30% la humedad antes de utilizarse en las calderas.

Tabla 31. Resultados del ICV para el secador de bagazo		
Insumo	Cantidad	Unidad
Bagazo de entrada	2.9761E-04	ton
Tornillos	1.1724E-12	ton
Electrodos	1.9539E-09	kg
Emisión por electrodos	1.0825E-09	g
Energía térmica	1.6028E-06	MJ
Agua removida	5.9522E-06	ton
Bagazo de salida	2.9166E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del inventario de ciclo de vida de la caldera uno, se muestra en la Tabla 32. En este equipo es importante el consumo de bagazo como fuente de energía y por las recirculaciones y aprovechamientos de la energía en los gases de combustión. Es por ello por lo que entra energía térmica con el aire para el quemador y una fracción para disminuir la humedad del bagazo. Otro aspecto de relevancia es la energía perdida, contabilizando hasta 67% de pérdidas, siendo de estas, 56% debidas durante la quema de bagazo, similares a lo reportado por Parvez y Hasan (2019). Aquí se vuelve importante la cantidad de humedad del bagazo que entra al horno, ya que de ser menor el contenido de agua, se aprovecharía aún más el poder calorífico del bagazo y se podría alcanzar con un secador de bagazo optimizado

(Franck Colombres *et al.*, 2010), ya que el que está actualmente funciona de manera ineficiente.

Tabla 32. Resultados del ICV para la caldera uno		
Insumo	Cantidad	Unidad
Bagazo	1.3020E-04	ton
Insumos de acero	9.3788E-13	ton
Insumos de construcción	1.4654E-10	ton
Electrodos	3.2240E-08	kg
Emisión por electrodos	3.0335E-08	g
Oxígeno	7.6784E-11	ton
Energía térmica	8.7096E-02	MJ
Vapor generado	6.5092E-01	MJ
Pérdidas de energía	1.3247E+00	MJ
Energía eléctrica	9.5968E-04	kWh
Transporte	1.8904E-06	tonkm

Fuente: Elaboración propia

Enseguida, en la Tabla 33 se muestran los flujos de materia y energía que participan en el intercambiador de calor uno. En este equipo los principales flujos son de energía, ya que se extrae aire desde el ambiente a través de un ventilador que consume energía eléctrica y lo pone en contacto con una tubería donde pasan los gases de combustión, cediendo parte de su energía hacia el aire, mismo que se utiliza para los hornos de bagazo. En este dispositivo existe otra área de oportunidad para utilizar parte de la energía de los gases de combustión para el secado del bagazo, lo que coincide con lo mencionado con los investigadores Centeno-González *et al.* (2017); Chantasiriwan (2019); Sosa-Armao y Nebra (2009) ya que reiteran que las ventajas de disminuir la humedad del bagazo radica en el mayor aprovechamiento de la energía para así generar igual o mayor cantidad de vapor con la misma cantidad de bagazo y la generación de energía eléctrica para auto abastecimiento o venta.

Tabla 33. Resultados del ICV para el intercambiador de calor uno		
Insumo	Cantidad	Unidad
Aire	6.3735E-04	ton
Gases de combustión	1.6655E-01	MJ
Energía eléctrica	6.3689E-04	kWh
Aire caliente	8.7096E-02	MJ

Tabla 33. Resultados del ICV para el intercambiador de calor uno		
Insumo	Cantidad	Unidad
Gases de combustión a menor temperatura	7.9458E-02	MJ

Fuente: Elaboración propia

Para la chimenea ligada a la caldera uno, los resultados se muestran en la Tabla 34. Como parte secuencial de la caldera uno, aquí el flujo de relevancia son los gases de combustión y las cenizas emitidas al ambiente. Se debe tomar especial atención al manejo final de la ceniza recuperada en los colectores de partículas y aún más controlar las emitidas a través de la chimenea, ya que por este medio es el vector de emisión tanto de partículas volantes, como de compuestos orgánicos volátiles, mismos que no se cuentan con registros de emisión, pero que, sin embargo, se conoce que son emitidos y forman parte de los precursores de ozono troposférico (C. Zhang *et al.*, 2020).

Tabla 34. Resultados del ICV para la chimenea uno		
Insumo	Cantidad	Unidad
Gases de combustión a menor temperatura	7.9458E-02	MJ
Energía eléctrica	1.6289E-03	kWh
Cenizas	2.0381E-06	ton
Gases para secado	6.4915E-07	MJ
Emisión de gases de combustión	7.9458E-02	MJ

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 35 se muestran los flujos de materia y energía que forman parte del tanque de dosificación. En este proceso los insumos principales son agua, antiespumante, acondicionador de lodos y sosa cáustica que será dosificada a la tubería del agua para calderas. A pensar que las cantidades respecto al agua para vapor son mínimas, la importancia radica en el transporte de dichos insumos ya que se realizan frecuentemente durante la operación de la fábrica. De igual manera la energía eléctrica consumida para el mezclado de los productos químicos.

Tabla 35. Resultados del ICV para el tanque de dosificación		
Insumo	Cantidad	Unidad
Agua	2.7281E-06	ton
Insumos de acero	7.9720E-12	ton

Tabla 35. Resultados del ICV para el tanque de dosificación		
Insumo	Cantidad	Unidad
Antiespumante	3.4506E-09	ton
Acondicionador de lodos	3.9489E-09	ton
Sosa cáustica	3.4451E-09	ton
Energía eléctrica	2.5171E-05	kWh
Agua tratada	2.7281E-06	ton
Transporte	2.2976E-05	tonkm

Fuente: Elaboración propia

Respecto al tanque de condensados puros, en la Tabla 36 se muestran los flujos de materia y energía. Este dispositivo es de vital importancia ya que su funcionalidad radica en recibir el agua condensada proveniente desde los calentadores de jugo, los tachos y los calentadores de jugo.

Tabla 36. Resultados del ICV para el tanque de condensados puros		
Insumo	Cantidad	Unidad
Agua de entrada	3.6352E-04	ton
Energía eléctrica	5.0498E-04	kWh
Agua de salida	3.6352E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Para el tanque de almacenamiento de agua, se muestran los flujos de materia y energía en la Tabla 37. El principal insumo lo conforma la energía eléctrica por el uso de una bomba de agua y materiales de acero como tornillos para el mantenimiento.

Tabla 37. Resultados del ICV para el tanque de almacenamiento de agua		
Insumo	Cantidad	Unidad
Agua de entrada	4.0392E-05	ton
Energía eléctrica	2.0022E-04	kWh
Insumos de acero	4.0704E-10	ton
Agua de salida	4.0392E-05	ton
Transporte	7.7224E-07	tonkm

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 38 se muestran los flujos de materia y energía que participaron en el deareador. En este equipo los principales insumos fueron tornillería, arandelas y codos de acero,

electrodos y oxígeno para soldaduras. Se tomaron en cuenta las emisiones atmosféricas generadas por las reparaciones.

Tabla 38. Resultados del ICV para el deareador		
Insumo	Cantidad	Unidad
Agua	4.0392E-04	ton
Insumos de acero	1.6823E-11	ton
Energía eléctrica	2.4138E-03	kWh
Electrodos	1.4654E-08	kg
Emisión por electrodos	1.3279E-08	g
Oxígeno	2.6526E-11	ton
Transporte	2.4354E-06	tonkm
Agua para calderas	4.0392E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Retomando la caldera dos, en Tabla 39 se muestran los flujos de materia y energía que la conforman. En este equipo, al igual que en la caldera uno, es importante el consumo de bagazo como fuente de energía y por las recirculaciones y aprovechamientos de la energía en los gases de combustión. Es por ello por lo que entra energía térmica con el aire para el quemador y una fracción para disminuir la humedad del bagazo. Un aspecto de relevancia es la energía perdida, contabilizando hasta 62% de pérdidas, siendo 50% debidas durante la quema de bagazo. Aquí se vuelve importante la cantidad de humedad del bagazo que entra al horno, ya que de ser menor el contenido, se aprovecharía aún más el poder calorífico del bagazo (Pellegrini y de Oliveira Jr, 2007; Sosa-Arno *et al.*, 2006; Sosa-Arno y Nebra, 2009) y se podría alcanzar con un secador de bagazo optimizado, ya que el que está actualmente funciona de manera ineficiente, tal cual se mencionó con la caldera uno.

Tabla 39. Resultados del ICV para la caldera dos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Bagazo	1.6146E-04	ton
Insumos de acero	2.1102E-12	ton
Insumos de construcción	9.7696E-11	ton
Electrodos	6.1549E-08	kg
Emisión por electrodos	5.7301E-08	g
Gas LP	6.0142E-11	ton
Oxígeno	1.5915E-10	ton

Tabla 39. Resultados del ICV para la caldera dos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Energía térmica	1.1480E-01	ton
Vapor generado	9.3965E-01	MJ
Pérdidas de energía	1.4759E+00	MJ
Energía eléctrica	9.5968E-04	kWh
Transporte	3.8140E-06	tonkm

Fuente: Elaboración propia

Enseguida, en el intercambiador de calor dos, la Tabla 40 muestra los flujos de materia y energía que participan. En este equipo los principales flujos son de energía, ya que se extrae aire desde el ambiente a través de un ventilador que consume energía eléctrica y lo pone en contacto con una tubería donde pasan los gases de combustión, cediendo parte de su energía hacia el aire, mismo que se utiliza para los hornos de bagazo.

Tabla 40. Resultados del ICV para el intercambiador de calor dos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Aire	7.9033E-04	ton
Gases de combustión	2.4942E-01	MJ
Energía eléctrica	1.6147E-03	kWh
Aire caliente	1.1480E-01	MJ
Gases de combustión a menor temperatura	1.3463E-01	MJ

Respecto a la chimenea dos, los flujos de materia y energía se ilustran en la Tabla 41. Como parte final de la caldera dos, aquí el flujo de relevancia son los gases de combustión y las cenizas emitidas al ambiente. De igual manera, se debe tomar especial atención al manejo final de la ceniza recuperada en los colectores de partículas y aún más controlar las emitidas a través de la chimenea.

Tabla 41. Resultados del ICV para la chimenea dos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Gases de combustión a menor temperatura	1.3463E-01	MJ
Energía eléctrica	3.2494E-03	kWh
Cenizas	2.5273E-06	ton
Gases para secado	9.5369E-07	MJ

Tabla 41. Resultados del ICV para la chimenea dos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Emisión de gases de combustión	1.3463E-01	MJ

Fuente: Elaboración propia

Los productos utilizados para el mantenimiento de los vehículos se muestran en la Tabla 42. Los flujos principales fueron aceites y el transporte vinculado al suministro de estos. Al igual que en operaciones anteriores, se recomienda implementar un formato de consumo de insumos como los planteados por Gasca *et al.* (2017) y Smith y Mobley (2003).

Tabla 42. Resultados del ICV para los vehículos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Aceites	4.6780E-10	ton
Transporte	1.7548E-06	tonkm

Fuente: Elaboración propia

Para el laboratorio, los resultados de los flujos contabilizados para el laboratorio de calderas se muestran en la Tabla 43. En este caso se muestran electrodos y oxígeno para soldadura, así como el transporte vinculado a dichos insumos.

Tabla 43. Resultados del ICV para el laboratorio		
Insumo	Cantidad	Unidad
Electrodos	5.8618E-09	kg
Emisión por electrodos	5.5491E-09	g
Oxígeno	1.0610E-10	ton
Transporte	1.6410E-06	tonkm

Fuente: Elaboración propia

Para finalizar la etapa de calderas, en la Tabla 44 se resumen todos los flujos de materia de uso general dentro del área de calderas. Se enfatiza el consumo de insumos de acero, construcción, grasas y aceites y electrodos, con sus respectivas emisiones atmosféricas. En esta tabla se vuelve importante la cantidad de transporte utilizado, ya que el consumo de insumos de mantenimiento demanda la adquisición constante de materiales y por ello el transporte aumenta respecto a los equipos anteriores de esta etapa.

Tabla 44. Resultados del ICV de los servicios en general		
Insumo	Cantidad	Unidad
Insumos de acero	2.4776E-08	ton
Insumos de construcción	2.8994E-08	ton
Electrodos	1.6484E-06	kg
Emisión por electrodos	1.5208E-06	g
Grasas y aceites	2.4077E-09	ton
Gas LP	1.1827E-09	ton
Oxígeno	4.4214E-09	ton
Transporte	2.8422E-04	tonkm

Fuente: Elaboración propia

Clarificación

En primer lugar, los resultados de la sulfitación del jugo, se muestra en la Tabla 45. En esta operación química se utilizó azufre granulado y se combustionó para generar dióxido de azufre que se canalizó al jugo. Se observó que existen emisiones fugitivas en el horno, por lo que representa un foco de atención que se debe corregir y que autores como Ogando *et al.*, (2021) mencionan y remarcan los daños ambientales por el manejo inadecuado de esta operación. También se incluyó el transporte correspondiente por su suministro a la fábrica.

Tabla 45. Resultados del ICV de la sulfitación del jugo		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo mezclado	7.4197E-04	ton
Azufre	5.7000E-05	ton
Transporte de azufre	5.0741E-05	ton
Jugo sulfitado	7.4202E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Enseguida, en la Tabla 46 se muestran los flujos de materia que conformaron el tanque colchón. En este caso, al ser un equipo donde se recibe y entrega jugo, no hubo flujos secundarios de mantenimiento ya que se trata de un tanque intermedio que sirve para recibir y entregar jugo al tanque de alcalización.

Tabla 46. Resultados del ICV para el tanque colchón		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo sulfitado	7.4202E-04	ton
Jugo filtrado	1.1130E-04	ton

Tabla 46. Resultados del ICV para el tanque colchón		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo sulfitado y filtrado	8.5332E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en la Tabla 47 se muestran los flujos de materia y energía que conformaron la preparación de la lechada de cal. Como se observa, el insumo principal fue el hidróxido de calcio y agua. Se consideró el transporte vinculado al suministro del óxido de calcio y se encontró que fue mayor que en otras operaciones, ya que el óxido de calcio es uno de los productos químicos con más demanda durante fase operativa de la fábrica, y a pesar de que se realizó en dos viajes en toda la zafra, por los volúmenes considerados, la cantidad por unidad funcional fue mayor.

Tabla 47. Resultados del ICV para la preparación de hidróxido de calcio		
Insumo	Cantidad	Unidad
Óxido de calcio	4.9467E-07	ton
Transporte de óxido de calcio	1.9213E-04	ton
Agua	4.7105E-06	ton
Energía eléctrica	6.6931E-05	kWh
Hidróxido de calcio	5.2052E-06	ton

Fuente: Elaboración propia

Respecto al tanque de alcalización, los resultados se observan en la Tabla 48. En este equipo se denota la cantidad de hidróxido de calcio requerido y la energía eléctrica necesaria para el bombeo de dicho insumo hacia el tanque.

Tabla 48. Resultados del ICV para el tanque de alcalización		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo sulfitado y filtrado	8.5332E-04	ton
Hidróxido de calcio	5.2052E-06	ton
Jugo alcalizado	8.5852E-04	ton
Energía eléctrica	2.4137E-04	kWh

Fuente: Elaboración propia

Los flujos de materia y energía se muestran en la Tabla 49 muestran los flujos de materia y energía utilizados en el calentador primario. En este equipo se utiliza vapores provenientes

de los evaporadores múltiple efecto. Como se observa, se utilizan sinergias dentro de la planta para el aprovechamiento de los flujos de energía.

Tabla 49. Resultados del ICV para el calentador primario		
Insumo	Cantidad	Unidad
Vapor	7.0208E-02	MJ
Jugo alcalizado	8.5852E-04	ton
Jugo alcalizado de salida	8.5852E-04	ton
Agua condensada	3.1601E-05	ton

Fuente: Elaboración propia

Para el calentador secundario, en la Tabla 50 se muestran los flujos de materia y energía. Nuevamente se consume vapor generado en la etapa de evaporación, por lo que se aprovecha la energía para aumentar la temperatura del jugo previa clarificación.

Tabla 50. Resultados del ICV para el calentador secundario		
Insumo	Cantidad	Unidad
Vapor	9.8291E-02	MJ
Jugo alcalizado calentado de entrada	8.5852E-04	ton
Jugo alcalizado calentado de salida	8.5852E-04	ton
Agua condensada	4.4241E-05	ton

Fuente: Elaboración propia

Para el calentador terciario, los flujos de materia y energía se observan en la Tabla 51. Al igual que en los calentadores anteriores, este también recibe energía térmica del vapor producido en los evaporadores.

Tabla 51. Resultados del ICV para el calentador terciario		
Insumo	Cantidad	Unidad
Vapor	4.2125E-02	MJ
Jugo alcalizado calentado de entrada	8.5852E-04	ton
Jugo alcalizado calentado de salida	8.5852E-04	ton
Agua condensada	1.8960E-05	ton

Fuente: Elaboración propia

Los insumos utilizados para la preparación del floculante se muestran en la Tabla 52. El insumo principal fue el floculador y el transporte vinculado a su suministro y dada las bajas cantidades demandadas, las cantidades respecto a otras operaciones fue menor.

Tabla 52. Resultados del ICV para la preparación del floculante		
Insumo	Cantidad	Unidad
Floculante	3.6143E-09	ton
Transporte de floculante	3.9807E-06	ton
Agua	4.3084E-06	ton
Energía eléctrica	4.0159E-05	kWh
Solución de floculante	4.3120E-06	ton

Fuente: Elaboración propia

Los flujos de materia que se consumieron para la preparación del floculante se muestran en la Tabla 53. Esta operación consistió en mezclar el floculante preparado con anterioridad y el jugo calentado.

Tabla 53. Resultados del ICV para la floculación		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo alcalizado de calentador final	8.5852E-04	ton
Solución de floculante	4.3120E-06	ton
Jugo alcalizado con floculante	8.6284E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Enseguida, en la Tabla 54 se muestran los flujos de materia y energía que formaron parte de la clarificación del jugo. En este proceso se obtuvieron jugo claro que continuará hacia evaporación y lodos. Estos lodos son de especial relevancia ya que, junto con el bagazo, se generan en grandes cantidades y su disposición debe ser adecuada para que no genere contaminación al suelo y agua. En el caso particular de la fábrica, la propia empresa y particulares hacen uso de ella para abonar los campos de cultivo de caña.

Tabla 54. Resultados del ICV para la cámara de clarificación		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo alcalizado con floculante	8.6284E-04	ton
Jugo clarificado	7.3424E-04	ton
Lodos	1.2860E-04	ton
Energía eléctrica	4.0159E-04	kWh

Fuente: Elaboración propia

Referente al mezclador de lodos, en la Tabla 55 se muestran los flujos de materia y energía consumidos. En este equipo los principales flujos resultaron ser el lodo generado en el

clarificador y 0.20% de la fracción fina del bagazo del conductor de bagazo dos. Se extrae con un ventilador del cual también se considera la energía eléctrica consumida.

Tabla 55. Resultado del ICV del mezclador de lodos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Lodos	1.2860E-04	ton
Bagacillo	1.7758E-06	ton
Lodo con bagacillo	1.3037E-04	ton
Energía eléctrica	3.0340E-04	kWh

Fuente: Elaboración propia

Para la filtración de lodos, en la Tabla 56 se muestran los flujos de materia y energía considerados en la filtración de lodos. En este procedimiento se obtuvo jugo filtrado que fue recirculado a la etapa de alcalización, mientras que los lodos generados con menor contenido de humedad son destinados a los campos de cultivo de caña para su aprovechamiento. Completando así una sinergia junto con el bagazo de caña y que coincide con lo que reporta Ochoa-George *et al.*, (2010) que también estudió el uso de la torta de filtro como combustible para el horno, encontrando que se emitían hasta 25% más de partículas volantes.

Tabla 56. Resultados del ICV para la filtración de lodos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Lodo con bagacillo	1.3037E-04	ton
Agua	1.0521E-05	ton
Energía eléctrica	1.1129E-03	kWh
Jugo filtrado	1.1130E-04	ton
Cachaza	2.9597E-05	ton

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Tabla 57 se muestran los insumos utilizados durante la operación y mantenimiento de manera general dentro del área de clarificación. Como se puede observar, solo se detectó el uso de gas LP y su respectivo transporte.

Tabla 57. Resultados del ICV para los servicios generales en clarificación		
Insumo	Cantidad	Unidad
Gas LP	5.1674E-10	ton
Transporte de Gas LP	3.5035E-07	tonkm

Fuente: Elaboración propia

Evaporación

Los flujos de materia y energía para el precalentador uno se muestra en Tabla 58. Se puede observar que el flujo principal en este etapa es el vapor de escape proveniente de molienda y la planta de fuerza. Se consideró una pérdida de energía del 2% (Hackett, 2018) así como las diferencias de energías respecto a la consumida y la necesaria. El agua condensada se recircula al tanque de condensados puros. En esta etapa, se hace hincapié en el aprovechamiento de la energía de los vapores de escape, mismos que coinciden con el trabajo de campo realizado por autores como Tibaquirá *et al.*, (2022) quienes reconfiguraron un ingenio azucarero con el fin de optimizar la energía perdida en los procesos de molienda y que el resultado coincide con la configuración del ingenio de estudio.

Tabla 58. Resultados del ICV para el precalentador uno		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo clarificado	7.3424E-04	ton
Energía eléctrica	5.9352E-04	tonkm
Vapor	7.9594E-01	MJ
Agua condensada	3.6430E-05	ton
Vapor de salida	7.9396E-01	MJ
Pérdidas de energía	1.9711E-03	MJ
Jugo precalentado uno	7.3424E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Para el precalentador dos, en la Tabla 59 se muestran los flujos de materia y energía que corresponden al precalentador dos. En esta operación el consumo de vapor fue uno de los flujos principales ya que se destina a calentar el jugo. Se consideró las pérdidas energía por la operación del equipo.

Tabla 59. Resultados del ICV del precalentador dos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo precalentado dos	7.3424E-04	ton
Vapor	1.1078E+00	MJ
Vapor de salida	1.0360E+00	MJ
Pérdidas de energía	1.4079E-03	MJ
Agua condensada	2.6021E-05	ton
Jugo precalentado final	7.3424E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Para el evaporador uno, los resultados del inventario de ciclo de vida se muestran en la Tabla 60. Para este equipo se detectaron los consumos de vapor de escape proveniente de la zona de molienda, de sosa cáustica para la limpieza de los tubos internos del dispositivo y se contemplaron las pérdidas de energía.

Tabla 60. Resultados del ICV para el evaporador uno		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo precalentado final	7.3424E-04	ton
Sosa cáustica	2.5948E-08	ton
Vapor de entrada	1.0360E+00	MJ
Energía requerida	7.3814E-01	MJ
Vapor para calentadores	2.8306E-01	MJ
Energía perdida	1.4763E-02	MJ
Jugo concentrado uno	4.1117E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Enseguida, para el evaporador dos, los resultados del inventario de ciclo de vida se muestran en la Tabla 61. Para este equipo también se consideró el consumo de vapor generado por el evaporador uno, de sosa cáustica para la limpieza de los tubos internos del dispositivo y se contemplaron las pérdidas de energía. A partir de este evaporador, se comenzó a disminuir la presión de los vasos para poder aprovechar el vapor generado en el equipo anterior, mismo que permite ahorrar energía, evitando la demanda de vapor directo de calderas, lo que coincide con el estudio publicado por Sathiyamoorthy *et al.*, (2013) y Tibaquirá *et al.*, (2022).

Tabla 61. Resultados del ICV para el evaporador dos		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo concentrado uno	4.1117E-04	ton
Sosa cáustica	2.5948E-08	ton
Vapor de entrada	5.8767E-01	MJ
Energía requerida	2.3401E-01	MJ
Vapor para calentadores	3.4898E-01	MJ
Energía perdida	4.6802E-03	MJ
Jugo concentrado dos	3.0233E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, para el evaporador tres, los resultados del inventario de ciclo de vida se muestran en la Tabla 62. Para este equipo también se consideró el consumo de vapor

generado por el evaporador dos, de sosa cáustica para la limpieza de los tubos internos del dispositivo y se contemplaron las pérdidas de energía.

Tabla 62. Resultados del ICV para el evaporador tres		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo concentrado dos	3.0233E-04	ton
Sosa cáustica	2.5948E-08	ton
Vapor de entrada	2.4029E-01	MJ
Energía para evaporador 4	1.3115E-01	MJ
Energía requerida en exceso	2.5678E-02	MJ
Energía perdida	8.3461E-02	MJ
Jugo concentrado tres	2.4475E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Enseguida, para el evaporador cuatro, los resultados del inventario de ciclo de vida se muestran en la Tabla 63 . Para este equipo también se consideró el consumo de vapor generado por el evaporador tres, de sosa cáustica para la limpieza de los tubos internos del dispositivo y se contemplaron las pérdidas de energía.

Tabla 63. Resultados del ICV para el evaporador cuatro		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo concentrado dos	2.4475E-04	ton
Sosa cáustica	2.5948E-08	ton
Vapor de entrada	1.2902E-01	MJ
Energía para evaporador 5	9.8585E-02	MJ
Energía requerida en exceso	2.2748E-02	MJ
Energía perdida	7.6910E-03	MJ
Jugo concentrado cuatro	2.0156E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Enseguida, para el evaporador cinco, los resultados del inventario de ciclo de vida se muestran en la Tabla 64 . Para este equipo también se consideró el consumo de vapor generado por el evaporador tres, de sosa cáustica para la limpieza de los tubos internos del dispositivo y se contemplaron las pérdidas de energía.

Tabla 64. Resultados del ICV para el evaporador cinco		
Insumo	Cantidad	Unidad
Jugo concentrado cuatro	2.0156E-04	ton

Tabla 64. Resultados del ICV para el evaporador cinco		
Insumo	Cantidad	Unidad
Sosa cáustica	2.5948E-08	ton
Vapor de entrada	9.7252E-02	MJ
Energía requerida	3.0587E-02	MJ
Energía perdida	6.6664E-02	MJ
Energía eléctrica	1.0927E-03	kWh
Meladura	1.7132E-04	ton

Fuente: Elaboración propia

Los flujos de materiales y energía principales utilizados en el área de evaporadores se muestran en la Tabla 65. Cabe resaltar el uso de gas LP y oxígenos para operaciones de soldadura, sin embargo, no se logró detectar la cantidad de electrodos utilizados en esta etapa, lo que representa un área de oportunidad para llevar el registro del resto de insumos utilizados.

Tabla 65. Resultados del ICV para servicios generales		
Insumo	Cantidad	Unidad
Gas LP	4.1477E-07	ton
Insumos de acero	2.1240E+00	ton
Oxígeno	1.4329E-09	ton
Transporte	4.2792E-05	tonkm

Fuente: Elaboración propia

Cristalización

Los resultados que se muestran en la Tabla 66 corresponden al balance de materia y energía correspondientes a los evaporadores “C”. En ellos se aprecian las cantidades de mieles “A” y “B” requeridas en el proceso. Aparte de la energía consumida proveniente del vapor de escape de la planta de fuerza y molienda. En este caso, el agua condensada es recuperada y enviada al tanque de condensados puros. El agua evaporada por acción del vapor de escape es recuperada a través de los condensadores y recirculados a las torres de enfriamiento.

Tabla 66. Resultados del ICV para los evaporadores 4 - C		
Insumo	Cantidad	Unidad
Miel A	4.8591E-05	ton
Miel B	1.4577E-05	ton
Vapor de entrada	8.5867E-02	MJ
Energía eléctrica	7.9160E-04	kWh

Tabla 66. Resultados del ICV para los evaporadores 4 - C		
Insumo	Cantidad	Unidad
Pie de temple C	6.3169E-05	ton
Agua evaporada	3.3024E-05	ton
Agua condensada	3.3024E-05	ton

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del inventario mostrado en la Tabla 67 corresponden al balance de materia y energía correspondientes a los evaporadores “C”. En ellos se aprecian las cantidades de masa o temple “C” y miel “B” requeridas en el proceso. Aparte de la energía consumida proveniente del vapor de escape de la planta de fuerza y molienda. En este caso, el agua condensada es recuperada y enviada al tanque de condensados puros. El agua evaporada por acción del vapor de escape es recuperada a través de los condensadores y recirculados a las torres de enfriamiento.

Tabla 67. Resultados del ICV para los evaporadores 5 - C		
Insumo	Cantidad	Unidad
Pie de temple C	3.1584E-05	ton
Miel B	3.1584E-05	ton
Vapor de entrada	5.3345E-02	MJ
Energía eléctrica	3.4098E-04	kWh
Masa C	6.3169E-05	ton
Agua evaporada	2.0516E-05	ton
Agua condensada	2.0516E-05	ton

Fuente: Elaboración propia

Los resultados que se muestran en la Tabla 68 corresponden al balance de materia y energía correspondientes a los evaporadores “B”. En ellos se aprecian las cantidades de semilla “C” y miel “A” requeridas en el proceso. Aparte de la energía consumida proveniente del vapor de escape de la planta de fuerza y molienda. En este caso, el agua condensada es recuperada y enviada al tanque de condensados puros. El agua evaporada por acción del vapor de escape es recuperada a través de los condensadores y recirculados a las torres de enfriamiento.

Tabla 68. Resultados del ICV para los evaporadores I - B		
Insumo	Cantidad	Unidad
Semilla C	2.6256E-05	ton
Miel A	5.9005E-05	ton

Tabla 68. Resultados del ICV para los evaporadores I - B		
Insumo	Cantidad	Unidad
Vapor de entrada	8.4397E-02	MJ
Energía eléctrica	7.0789E-04	kWh
Masa B	9.5186E-05	ton
Agua evaporada	3.2459E-05	ton
Agua condensada	3.2459E-05	ton

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la Tabla 69 corresponden al balance de materia y energía correspondientes a los evaporadores “A”. En ellos se aprecian las cantidades de semilla “B” y meladura requeridas en el proceso. Aparte de la energía consumida proveniente del vapor de escape de la planta de fuerza y molienda. En este caso, el agua condensada es recuperada y enviada al tanque de condensados puros. El agua evaporada por acción del vapor de escape es recuperada a través de los condensadores y recirculados a las torres de enfriamiento.

Tabla 69. Resultados del ICV para los evaporadores 2,3,6 - A		
Insumo	Cantidad	Unidad
Semilla B	5.0535E-05	ton
Meladura	1.2204E-04	ton
Vapor de entrada	1.8546E-01	MJ
Energía eléctrica	6.5209E-04	kWh
Masa de A	1.7258E-04	ton
Agua evaporada	3.2459E-05	ton
Agua condensada	3.2459E-05	ton

Fuente: Elaboración propia

Los resultados que se muestran en la Tabla 69 corresponden al balance de materia y energía correspondientes a los evaporadores “A”. En ellos se aprecian las cantidades de semilla “B” y meladura requeridas en el proceso. Aparte de la energía consumida proveniente del vapor de escape de la planta de fuerza y molienda. En este caso, el agua condensada es recuperada y enviada al tanque de condensados puros. El agua evaporada por acción del vapor de escape es recuperada a través de los condensadores y recirculados a las torres de enfriamiento.

Tabla 70. Resultados del ICV para los servicios en general		
Insumo	Cantidad	Unidad
Insumos de acero	1.6559E-08	ton
Gas LP	1.8116E-10	ton
Oxígeno	1.0605E-09	ton
Electrodos	3.3901E-10	ton
Emisiones por electrodos	3.1288E-10	g
Transporte	5.2054E-05	tonkm

Fuente: Elaboración propia

Centrifugación

Los resultados del balance de materia y energía para las centrifugas de “C”, se muestran en la Tabla 71. De esta operación entra masa “C” y se separa en semilla “C” y melaza. Este es la salida de uno de los subproductos principales en la fabricación de azúcar, y para ello, se utilizaron diversos insumos para las reparaciones y mantenimiento de los equipos, es por ello por lo que se contabilizaron las emisiones de gases, insumos de acero y el transporte vinculado a estos.

Tabla 71. Resultados del ICV para las centrifugas C		
Insumo	Cantidad	Unidad
Masa C de entrada	6.3169E-05	ton
Semilla C de salida	2.6256E-05	ton
Melaza	3.6913E-05	ton
Energía eléctrica	2.5371E-03	kWh
Electrodos	1.7585E-11	ton
Emisiones por electrodos	1.7288E-11	g
Insumos de acero	9.6368E-12	ton
Transporte	2.6084E-06	tonkm

Fuente: Elaboración propia

Para las centrifugas de “B”, los resultados del balance de materia y energía se muestran en la Tabla 72. De esta operación entra masa “C” y se separa en semilla “B” y miel “B”. Este es la salida de uno de los subproductos principales en la fabricación de azúcar, y para ello, se utilizaron diversos insumos para las reparaciones y mantenimiento de los equipos, es por ello por lo que se contabilizaron las emisiones de gases, insumos de acero y el transporte vinculado a estos.

Tabla 72. Resultados del ICV para las centrífugas B		
Insumo	Cantidad	Unidad
Masa de B entrante	9.5186E-05	ton
Semilla B de salida	5.0535E-05	ton
Miel B de salida	4.4651E-05	ton
Energía eléctrica	2.6934E-03	kWh

Fuente: Elaboración propia

Para las centrífugas de “A”, los resultados del balance de materia y energía se muestran en la Tabla 73. De esta operación entra masa “A” y se separa en azúcar húmeda y miel de “A”. En este dispositivo se obtiene el producto principal y miel A, precursor para la formación de semillas en los evaporadores anteriores. Se registraron los diversos insumos para las reparaciones y mantenimiento de los equipos, es por ello por lo que se contabilizaron las emisiones de gases, insumos de acero y el transporte vinculado a estos.

Tabla 73. Resultados del ICV para las centrífugas A		
Insumo	Cantidad	Unidad
Masa A de entrada	1.7258E-04	ton
Azúcar húmeda	9.1302E-05	ton
Miel de A	8.1273E-05	ton
Energía eléctrica	5.3911E-03	kWh
Electrodos	7.8157E-12	ton
Emisiones por electrodos	7.0029E-12	g
Insumos de acero	1.4039E-11	ton
Transporte	4.8224E-06	tonkm

Fuente: Elaboración propia

La bomba sifón se incluyó como equipo independiente ya se trata de uno motor importante para la recuperación de agua desde el tanque sifón. En este caso, se consideraron los recursos para su mantenimiento, incluyendo el transporte de los insumos de acero, se muestra en la Tabla 74.

Tabla 74. Resultados del ICV para la bomba sifón		
Insumo	Cantidad	Unidad
Insumos de acero	5.1291E-12	ton
Transporte	1.5810E-06	tonkm

Fuente: Elaboración propia

Para finalizar esta sección, en la Tabla 75 se muestra el resultado del inventario de ciclo de vida de los recursos materiales y energéticos utilizados en los distintos equipos de cristalización. Como se puede observar, se consumen diversos insumos como grasas, aceites, electrodos, oxígeno y gas LP. De la misma manera, se observan las emisiones generadas por el uso de soldadura.

Tabla 75. Resultados del ICV los servicios generales		
Insumo	Cantidad	Unidad
Insumos de acero	2.8562E-09	ton
Grasas y aceites	6.8417E-11	ton
Electrodos	4.9200E-10	ton
Emisiones por electrodos	4.4367E-10	g
Oxígeno	1.2230E-09	ton
Gas LP	2.4109E-10	ton
Transporte	7.5560E-05	tonkm

Fuente: Elaboración propia

Secado y empackado

En el secado y empackado no se lograron detectar de manera específica los consumos de materiales y energía para cada dispositivo. Por lo tanto, en la Tabla 76 se muestran los resultados generales. En esta etapa, el principal producto es el azúcar húmeda y los sacos. En este punto se vuelve de interés por la ruta que sigue el empaque y el destino que siguiera después del su uso. También se muestra la cantidad de vapor requerida y las pérdidas de energía estimadas para dicho dispositivo de secado. Aun así, existen áreas de mejora que menciona Tibaquirá *et al.*, (2022) ya que en el actual estudio se utiliza vapor directo de calderas, cuando se puede realizar una reconfiguración para aprovechar la energía en vapores de escape.

Tabla 76. Resultados del ICV los servicios generales		
Insumo	Cantidad	Unidad
Azúcar húmeda	1.0550E+06	ton
Sacos para azúcar	2.8122E-08	ton
Oxígeno	1.5915E-10	ton
Gas LP	5.8622E-08	ton
Aire caliente	3.1697E-02	MJ
Pérdida de energía	3.1697E-03	MJ

Tabla 76. Resultados del ICV los servicios generales		
Insumo	Cantidad	Unidad
Energía eléctrica	1.8060E-03	kWh
Transporte	9.8542E-05	tonkm
Azúcar seca	1.0000E+02	g

Fuente: Elaboración propia

Planta de fuerza

En el primer generador de electricidad, los resultados del balance de materia y energía se muestran en la Tabla 77. En este caso, los flujos principales de entrada fueron el vapor proveniente de calderas y agua de enfriamiento. Como salidas principales fueron la energía eléctrica y el agua de enfriamiento. En esta operación del sistema, cabe resaltar que cumple con distintos lineamientos enfocados a la economía circular, ya que, a partir de un potencial residuo, se genera energía eléctrica, evitando así el consumo de combustibles fósiles, tal como lo mencionan Cárcamo y Peñabaena-Niebles (2022); Pavan *et al.*, (2021) y al mismo tiempo disminuyendo la demanda de energía desde la red eléctrica nacional. Como ya ha mencionado anteriormente, existen posibilidades de mejorar del rendimiento de la producción de vapor y energía eléctrica desde el contenido de humedad del bagazo, para ello, se tiene que estudiar con mayor profundidad, la capacidad de generación de energía con los sistemas de generación actuales.

Tabla 77. Resultados del ICV del generador ELIN		
Insumo	Cantidad	Unidad
Vapor de entrada	2.9219E-01	MJ
Agua de enfriamiento entrada	1.3603E-01	ton
Agua de enfriamiento salida	1.3603E-01	ton
Vapor de escape	2.5625E-01	MJ
Energía eléctrica	5.5601E-03	kWh

Fuente: Elaboración propia

En el segundo generador de electricidad, los resultados del balance de materia y energía se muestran en la Tabla 78. Nuevamente, los flujos principales de entrada fueron el vapor proveniente de calderas y agua de enfriamiento. Como salidas principales fueron la energía eléctrica y el agua de enfriamiento.

Tabla 78. Resultados del ICV del generador General Electric		
Insumo	Cantidad	Unidad
Vapor de entrada	2.8624E-01	MJ
Agua de enfriamiento entrada	1.3327E-01	ton
Agua de enfriamiento salida	1.3327E-01	ton
Vapor de escape	2.4528E-01	MJ
Energía eléctrica	5.4470E-03	kWh

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Tabla 79 se muestran los resultados del balance de materia y energía en el área de secado y empaclado. Al igual que en otras operaciones, aquí se denota el consumo de insumos de acero, grasas y aceites y emisiones atmosféricas por el uso de electrodos.

Tabla 79. Resultados del ICV de los servicios generales		
Insumo	Cantidad	Unidad
Insumos de acero	6.3869E-09	ton
Grasas y aceites	1.6021E-09	ton
Cemento	1.3384E-09	ton
Oxígeno	2.0522E-10	ton
Electrodos	8.2846E-11	ton
Emisiones atmosféricas	7.4186E-11	g
Transporte	4.4768E-05	tonkm

Fuente: Elaboración propia

10.8. Evaluación de impacto de ciclo de vida

Los impactos ambientales obtenidos para el cultivo y procesamiento de azúcar se presentan en la Tabla 80. Enseguida, se muestra una comparación general de los procesos involucrados en el sistema de estudio y la participación que cada uno obtuvo para la huella de carbono, hídrica y energética, representadas en las Figura 20, Figura 21 y Figura 22, respectivamente. Posteriormente, se compara y discute con otros resultados de literatura nacional e internacional.

Tabla 80. Resultados generales por etapa para la producción de 100 gramos de azúcar			
	Huella de carbono (kg CO₂ eq)	Huella hídrica (m³)	Huella energética (MJ)
Agrónoma			
Subsolado	0.1397E-03	0.3871E-06	1.8887E-03
Rastreo	0.1422E-03	0.4111E-06	1.9130E-03

Tabla 80. Resultados generales por etapa para la producción de 100 gramos de azúcar			
	Huella de carbono (kg CO₂ eq)	Huella hídrica (m³)	Huella energética (MJ)
Surcado	0.1313E-03	0.3057E-06	1.8062E-03
Siembra	0.1610E-03	0.3426E-03	0.5249E-03
Fertilización	3.8752E-03	51.054E-03	45.159E-03
Control de malezas	24.851E-06	0.5385E-06	0.4516E-03
Quema y corte	18.15E-03	0.2963E-06	1.7967E-03
Industrial			
Recepción	3.9042E-03	4.0134E-03	68.813E-03
Molienda	2.0482E-03	10.735E-06	32.871E-03
Calderas	0.4436E-03	4.4236E-06	1380.80E-3
Clarificación	6.1942E-03	54.374E-06	538.77E-03
Evaporación	0.2053E-03	4.7652E-06	19.035E-03
Cristalización	0.2313E-03	47.288E-06	62.504E-03
Centrifugación	0.7528E-03	0.1989E-03	90.805E-03
Secado y empaçado	1.2376E-03	2.5394E-06	1.2376E-03
Servicios generales	0.8073E-03	0.1482E-03	47.261E-03
Energía no aprovechada	3.2494E-03	0.1943E-03	688.07E-03

Fuente: Elaboración propia

Para la huella de carbono (Figura 20), la etapa de corte y quema de la caña aportó la mayor cantidad de emisiones atmosféricas (43.7%) debido a la actividad de quema de la caña, ya que durante esta se emiten gases al ambiente debido a la combustión no controlada. En segundo lugar, la etapa de clarificación participó con 14.9% de los impactos, también debió a la combustión, ya que en esta etapa se consume azufre para generar dióxido de azufre, requerido para el jugo proveniente de molienda. Sin embargo, el procedimiento se lleva a cabo en un dispositivo que presenta fugas fugitivas que contribuyen con el cambio climático. Por otro lado, 9.4% se contribuyó por la recepción de la materia prima en la fábrica, principalmente por el transporte vinculado con el traslado de la caña desde los campos de cultivo hasta el ingenio. Por otra parte, 9.2% se relaciona con la etapa de fertilización de la caña, y esto se debe al consumo de productos químicos para el correcto desarrollo de la caña y su respectivo sitio de adquisición a la zonas de cultivo. 7.8% de los impactos corresponden a la energía no aprovechada en el área de calderas y la distribución en forma de vapor requerido en la fábrica. El resto de las operaciones contribuyó en conjunto 15%, las cuales se relacionan con los insumos consumidos durante el mantenimiento de los equipos y el consumo de energía eléctrica.

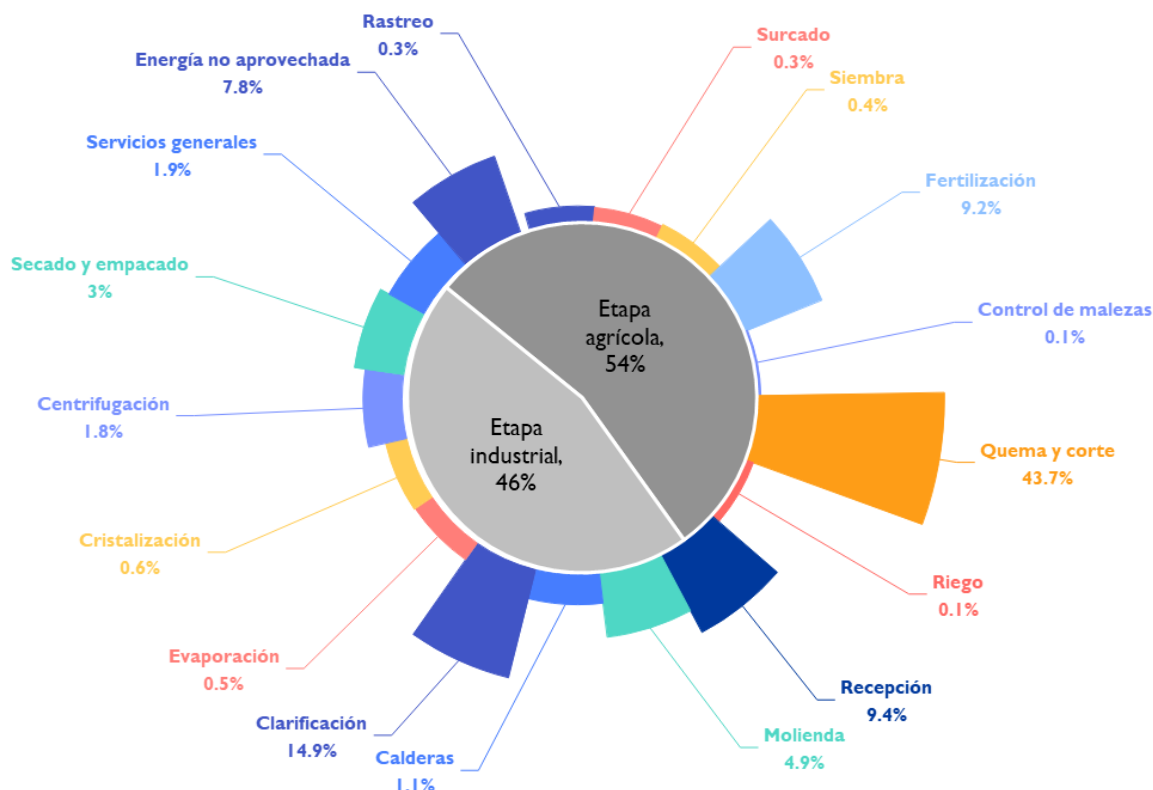


Figura 20. Diagrama de los resultados por etapa y subetapa de la huella de carbono
Fuente: Elaboración propia.

Para la huella hídrica (Figura 21), el mayor consumo de agua se contabilizó para el riego de los campos de cultivo (90.90%), ya que es la etapa donde se requiere la mayor cantidad de agua para el desarrollo de la planta y que es obtenida de un cuerpo hídrico para distribuirla hacia los cañales. En el análisis de la huella hídrica también se incluyó el agua de lluvia, sin embargo, solo representa 0.02% del agua total de riego debido a las características geográficas del sitio y la cantidad de agua requerida de manera artificial fue mayor que la que se precipita. Por otro lado, durante la recepción de la materia prima contribuyó con 7.20% que se relaciona con el agua para el lavado de la caña, mientras que la siembra y la centrifugación contribuyeron solo con 0.6% y 0.4% que se vincula con los procesos de manufactura de los productos agroquímicos e insumos utilizados durante la operación y mantenimiento en fábrica.

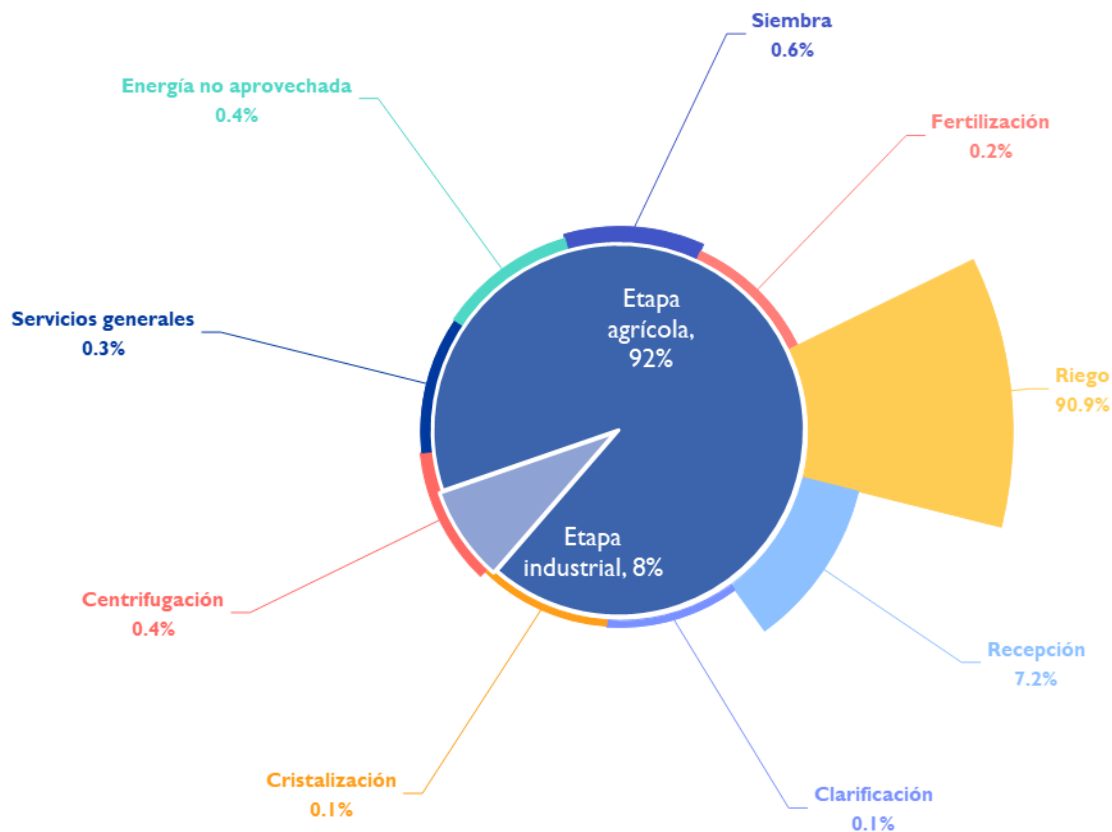


Figura 21. Diagrama de los resultados por etapa y subetapa de la huella hídrica
Fuente: Elaboración propia.

Para la huella energética (Figura 22), el principal contribuyente a la categoría fueron las operaciones en calderas, ya que el consumo de bagazo como fuente energética propició con 46.30% del consumo total de energía durante la producción de azúcar. A pesar de representar una magnitud alta, cabe resaltar que la mayor parte proviene de fuente renovable, ya que las calderas funcionan con biomasa, lo cual evita el consumo de combustibles fósiles. En consecuencia, la energía que se contabilizó como no aprovechada, contribuyó con 23.10%, la cual representa las áreas de oportunidades y mejoras para el sistema en virtud del aumento de la eficiencia energética. En menor proporción, nuevamente la clarificación aportó 18.10%, debido al requerimiento energético durante la extracción del azufre requerido desde la fuente. El 15.50% de aporte se originó por los procesos de manufactura y transporte de los insumos requeridos durante la etapa operativa y de mantenimiento de la fábrica.

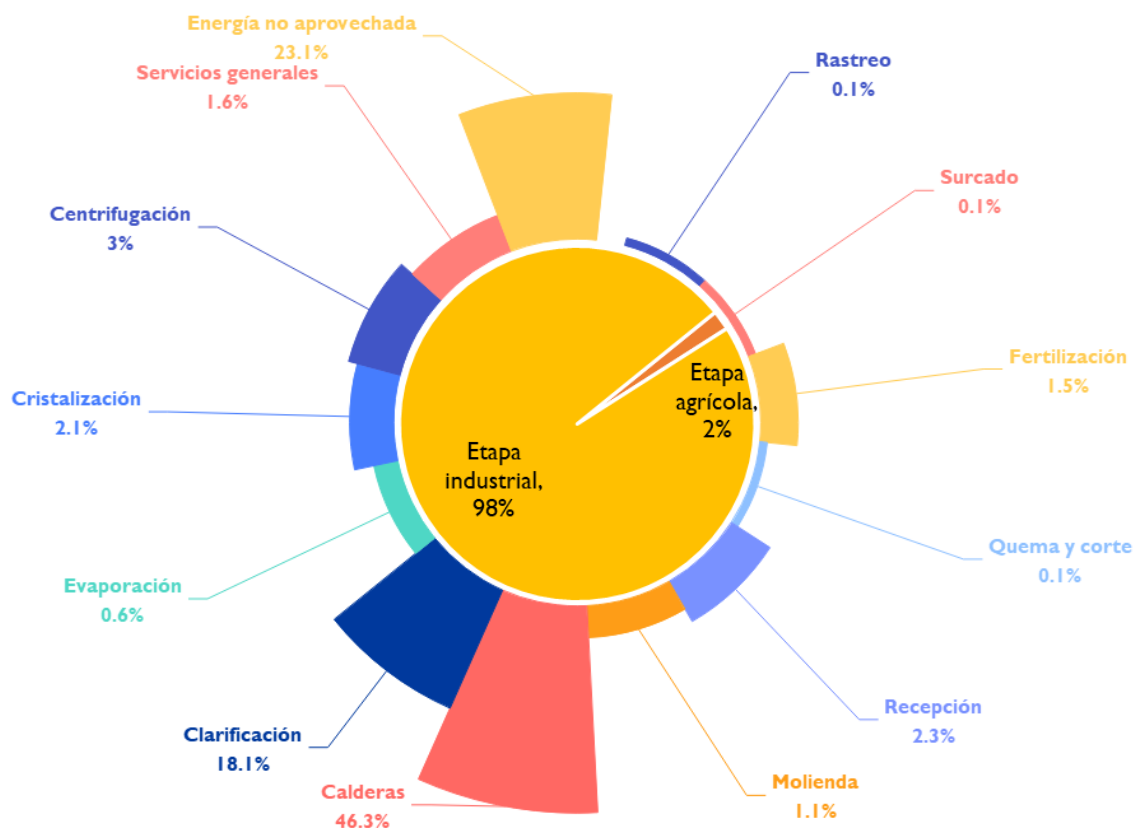


Figura 22. Diagrama de los resultados por etapa y subetapa de la huella energética
Fuente: Elaboración propia.

Diversos autores han abordado el estudio de la producción de azúcar alrededor del mundo, cada uno tiene peculiaridades que definen el rango de las magnitudes estudiadas como se observa en la Figura 23. La huella de carbono (kg CO₂ eq/ton azúcar), hídrica (m³ agua/ton azúcar) y energética (MJ/ton azúcar) varía entre cada zona de estudio, lo que demuestra la particularidad de cada uno. Sin embargo, hay autores que remarcar, como Ramjeawon (2004), quién reportó la emisión de 233 kg de CO₂ eq de los cuáles 10.2% se adjudican al transporte de caña, 35.2% al cultivo y cosecha y 54.5% a la aplicación de fertilizantes y herbicidas. A pesar de ser uno de los primeros estudios realizados y el resultado con menor magnitud, se menciona que las emisiones por la quema de bagazo son nulas, ya que provienen de fuente biogénica, sin embargo, no consideró las emisiones generadas por ineficiencias en la combustión. Caso contrario al actual estudio donde si se toman en cuenta las emisiones generadas por la quema del combustible, al igual que Renouf y Wegener (2007), salvo que

en su estudio reportó que 59% del aporte a la huella de carbono provino por el crecimiento de la caña, 20% por el consumo de energía eléctrica para riego artificial, 9% por uso de transporte y maquinaria agrícola, 5% por la fabricación y consumo de productos agroquímicos y 5% por la combustión del bagazo. Por otra parte, Meza-Palacios *et al.*, (2019) mencionó que de los 790 kg de CO₂ emitidos 52% corresponden a la etapa agrónoma, 12.1% al transporte de la caña, 25.7% a la quema de bagazo y 10.2% al resto de operaciones dentro de la fábrica, dichos resultados se asemejan al actual estudio, ya que se trata de un trabajo realizado en la misma región. Por el contrario, un caso especial es el presentado por Gunawan *et al.*, (2019) quién menciona que en su zona de estudio emitieron 11,118 kg de CO₂ eq y se consumieron 116,562 MJ, donde más del 95% de los impactos se relacionan con la etapa industrial, ya que utilizan carbón como fuente de energía para el funcionamiento de las calderas.

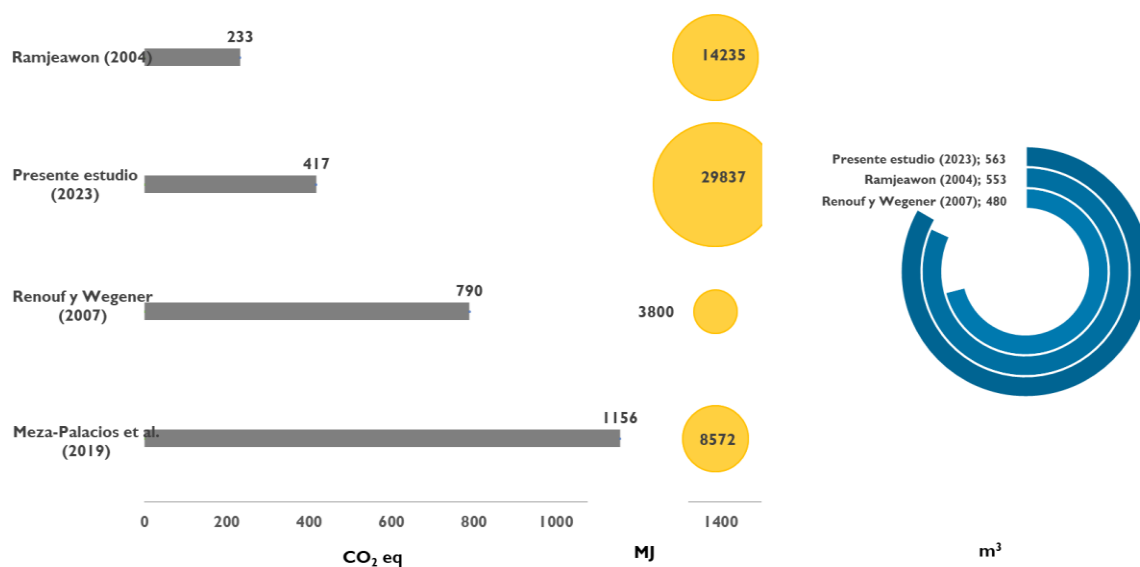


Figura 23. Resultados de la huella de carbono (izquierda), huella energética (centro) y huella hídrica (derecha) de diversos investigadores.
Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, la distribución del consumo energético por fuente primaria se compara en la Figura 24. De manera particular, se muestra que, para la fertilización, la principal fuente de participación es la biomasa proveniente de energía no renovable, ya que la fabricación de fertilizantes puede usar energía no renovable de biomasa como una forma de obtener los

componentes necesarios para producir fertilizantes, como el nitrógeno. Otro flujo para considerar es durante la clarificación, con la cuál, 71% del consumo energético proviene de fuente fósil, la cual se relaciona con su producción ya que es contaminante debido a las emisiones de compuestos de azufre durante su extracción y refinación. En adición, en la etapa de calderas y la pérdida de energía, son asociadas con 58 y 32% respectivamente a la energía proveniente de fuente renovable fósil, la cuál es evidente ya que en dichas etapas se utiliza el bagazo generado como residuo de la molienda, como combustible para el funcionamiento de dichas calderas. La energía no aprovechada se vincula con la energía perdida en la misma etapa.

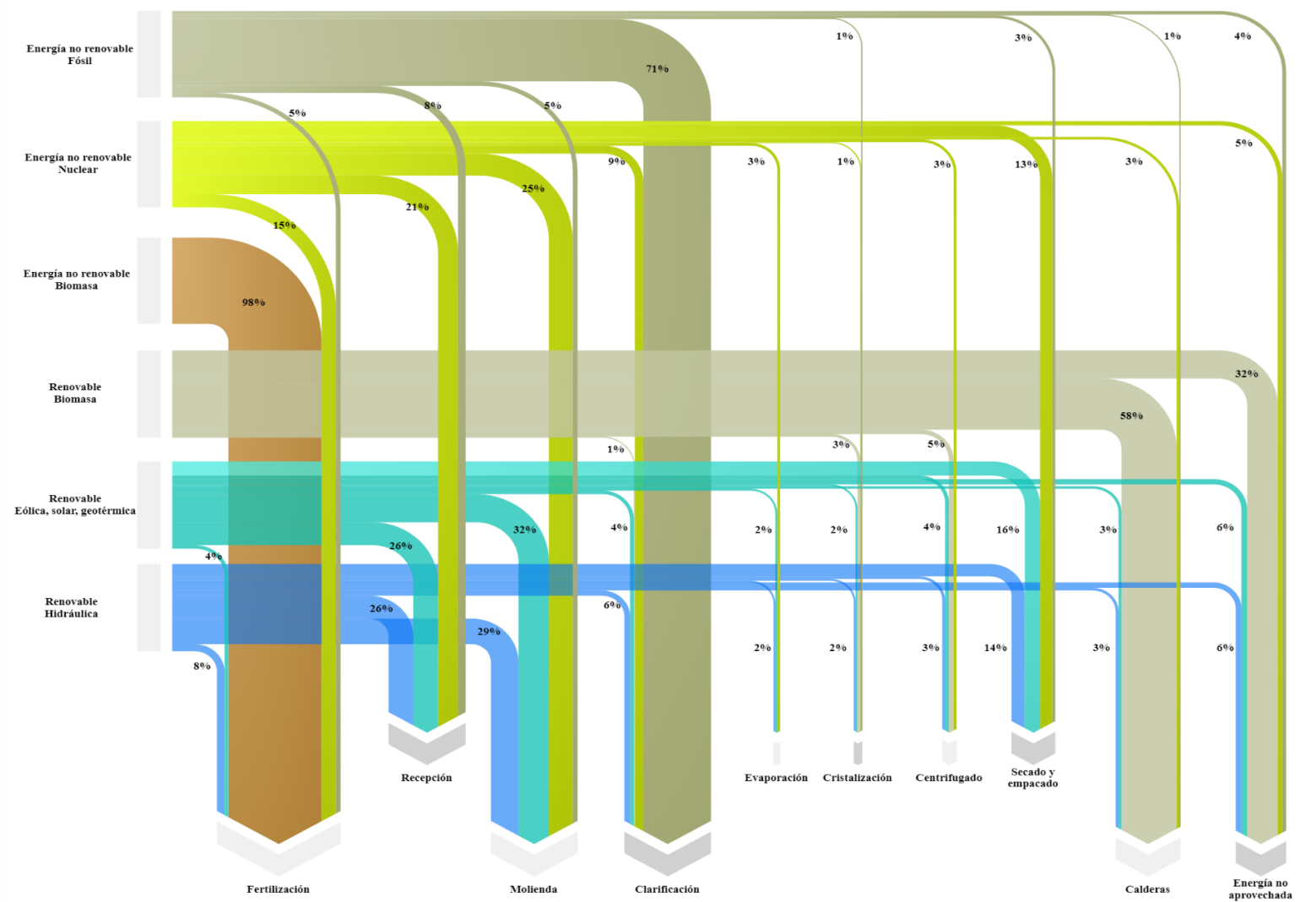


Figura 24. Distribución del consumo energético primario en la cadena de producto
Fuente: Elaboración propia.

10.8.1. Etapa agrónoma

En el siguiente apartado se muestran los resultados de la etapa agrónoma. Se clasifican en preparación del terreno, que incluye las labores de subsoleo, rastreo, surcado y siembra; crecimiento por fertilización y control de malezas; cosecha por quema y corte de la caña. En cada una se describen los hallazgos encontrados por cada tipo de huella estudiada.

Huella de carbono

En la Figura 25 se aprecian los resultados asociados a la huella de carbono de la etapa agrónoma. Se obtuvieron 0.018 kg de CO₂ eq emitidos por cada 100 gramos de azúcar producida, de los cuáles 80.22% de los impactos corresponden a la cosecha de la caña, principalmente atribuido a las actividades de quema de los campos de cultivo. Esto se debe a que, durante la quema, una parte del carbono existente en la caña y suelo no se oxida inmediatamente a dióxido de carbono, si no en metano lo que lo convierte en una principal fuente contaminante para la etapa agrícola (Dlugokencky y Houweling, 2015; Flores-Jiménez *et al.*, 2019). Por otro lado, 17.95% corresponden al crecimiento de la caña, que está conformada por 16.87% por contribución de la fertilización, 0,71% por la siembra, 0,26% por riego artificial y 0,11 por la aplicación de herbicidas.

De manera específica, durante la siembra; la fabricación de los productos agroquímicos derivados de nitrógeno, fosfatos, potasio y urea aportaron 51.2%, 4.79% 7.71% y 20.1% respectivamente mientras que 14.8% al transporte desde las zonas de distribución a los campos de cultivo. Por otra parte, durante el control de malezas, el producto químico diuron aportó el 80% y el resto se distribuyó a la fabricación de triazina, glifosato y al transporte de ambos productos. La diferencia entre la fertilización y el control de malezas radica a que, durante el control de malezas, los productos químicos aplicados disminuyen debido a que se aplican en los perímetros de los campos, ya que la densidad de las cañas en crecimiento evita entrar y controlar la maleza que crece entre las cañas. Caso contrario sucede durante la fertilización, puesto que la aplicación de fertilizantes se realiza en una etapa temprana de crecimiento donde aún el espacio entre las varas facilita el transporte y aplicación del agroquímico en toda el área cultivada. Respecto a la preparación del suelo, el

subsolado, rastreo y surcado aportaron 0.62%, 63% y 58% respectivamente y se debió principalmente al uso de los tractores para las labores requeridas para el adecuamiento del suelo previa a la siembra.

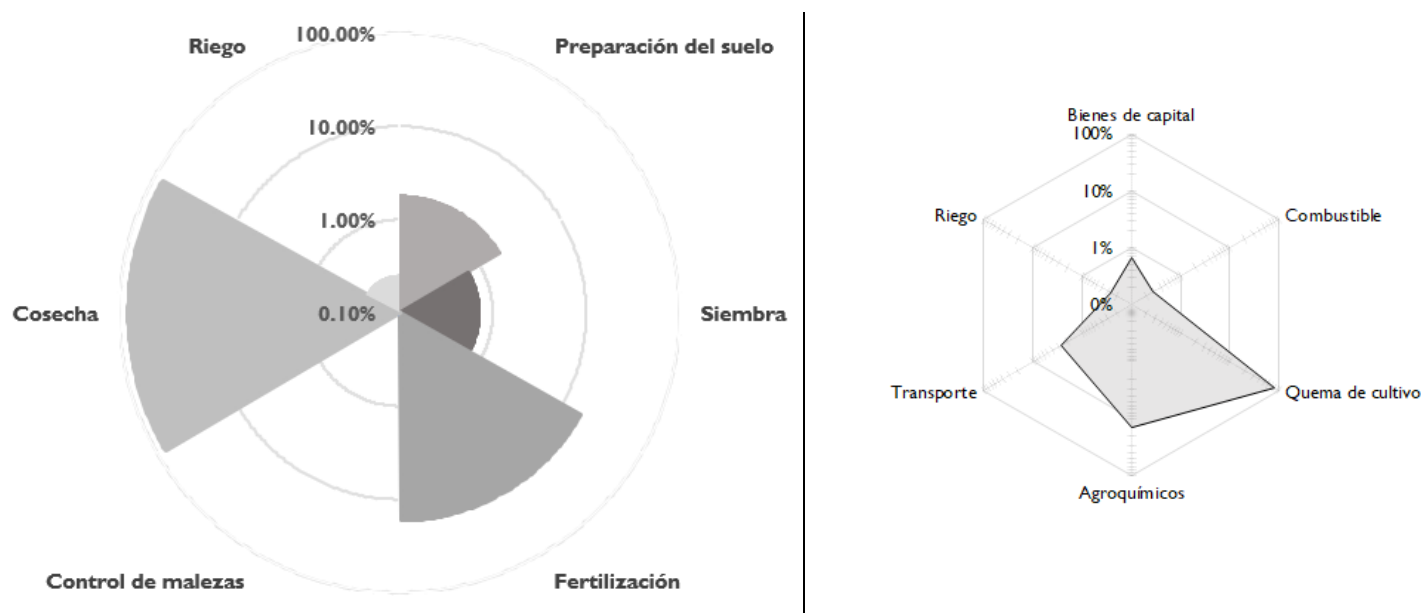


Figura 25. Resultados de la huella de carbono por etapa (izquierda) y por operaciones (derecha)

Fuente: Elaboración propia

Analizando la información desde el enfoque de operaciones, de lado derecho de la Figura 25 se observa que la quema de cultivo contribuyó nuevamente con los mayores impactos (81.74%), comparado con otras actividades como el consumo de productos agroquímicos (14.43%), el uso de transporte (2.62%) tanto de fertilizantes, herbicidas, agua para aplicación de productos químicos y semillas y en menor medida los bienes de capital (0.66%), consumo de combustibles (0.28%) y el riego (0.26%), demuestra la importancia de tomar en cuenta dicha actividad cultural si se desea introducir otros métodos de cosecha que cumplan los mismos o mejores requerimientos para la extracción del azúcar y que sean de menor impacto ambiental.

Huella de hídrica

El consumo de agua durante la etapa agrónoma fue de 0.0514 m³ por 100 gramos de azúcar. Los resultados de la huella hídrica se muestran en la Figura 26; en ella, se muestra que la

etapa de riego resultó el mayor contribuidor con 99.14%, lo cual era de esperar, ya que el riego por gravedad se realiza previa fertilización y en días específicos hasta 2 o 3 días de riego continuo hasta 2 veces al mes durante dos meses, para que el suelo esté húmedo y con drenaje para mayor aprovechamiento de los productos químicos. En menor participación, se encuentra la siembra y la fertilización con 0.67% y 0.19%, mismos que aportan por el consumo de productos agroquímicos.

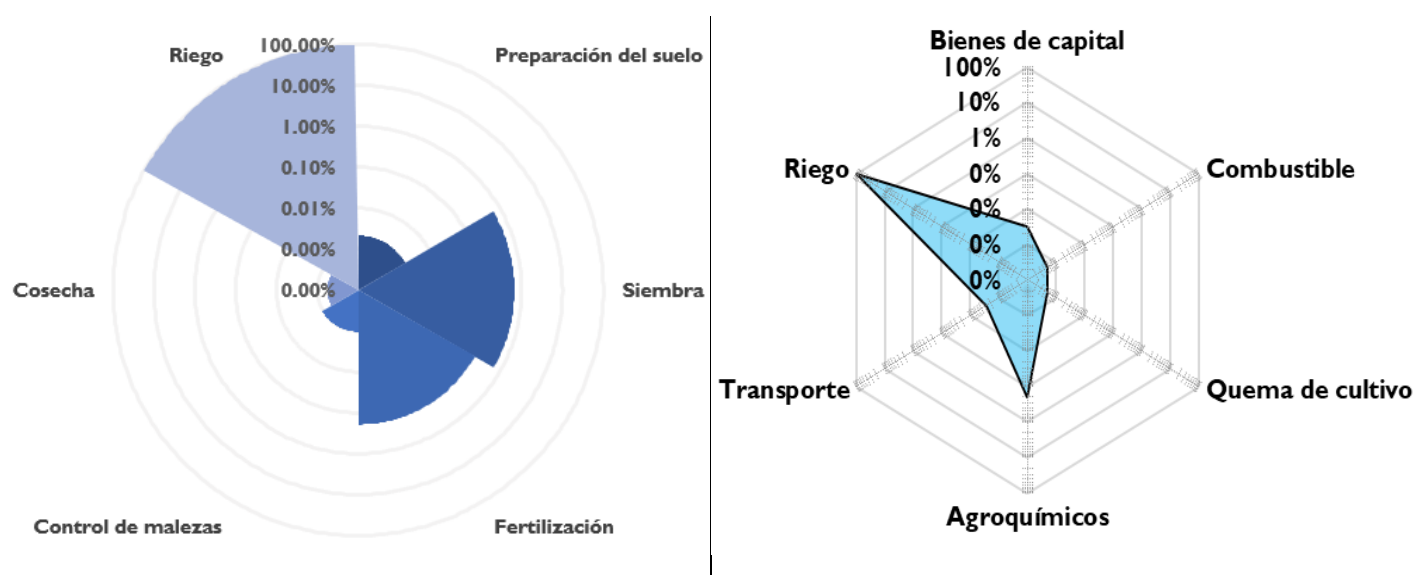


Figura 26. Resultados de la huella de hídrica por etapa (izquierda) y por operaciones (derecha)
Fuente: Elaboración propia

Respecto a las operaciones, el riego sigue siendo el mayor contribuyente con 99.80% y 0.19% por el consumo de los productos químicos utilizados durante la fertilización y control de malezas. En este caso, no es posible sustituir el método de riego, ya que es el que funciona en la zona y la cuál los productores tienen arraigado por la facilidad e infraestructura existente. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos que se realizan para la correcta distribución y aprovechamiento del recurso hídrico, es necesario mejorar las acciones para que la gestión adecuada y oportuna, para evitar inundaciones y pérdidas por agua por derrames en zonas con desnivel.

Huella energética

Los resultados de la huella energética se muestran en la Figura 27. Para esta, la etapa que contribuyó en mayor porcentaje fue la fertilización (83.73%), seguido de la preparación del terreno (10.40%), la quema y corte (3.33%) y 2.54% correspondientes a la siembra, el control de malezas y el riego.

Para el caso de la fertilización, el consumo de nutrientes con contenido en nitrógeno, fosfato, potasio y urea contribuyeron con 32.5, 7.43, 8.66 y 30.2% respectivamente. El porcentaje restante se debe al propio transporte utilizado para el suministro de tales insumos. Respecto a la preparación del terreno, lo conforma el subsolado, el rastreo y el surcado, mismos que de forma individual contribuyeron con 3.50%, 3.55% y 3.35% respectivamente y la razón principal es debida al consumo de diésel para el funcionamiento de los tractores, mismo caso para la etapa de cosecha, ya que en ella se utilizan las alzadoras de caña que también funcionan con combustible, y es por ello por lo que aportaron 3.33% de los impactos totales para la huella energética.

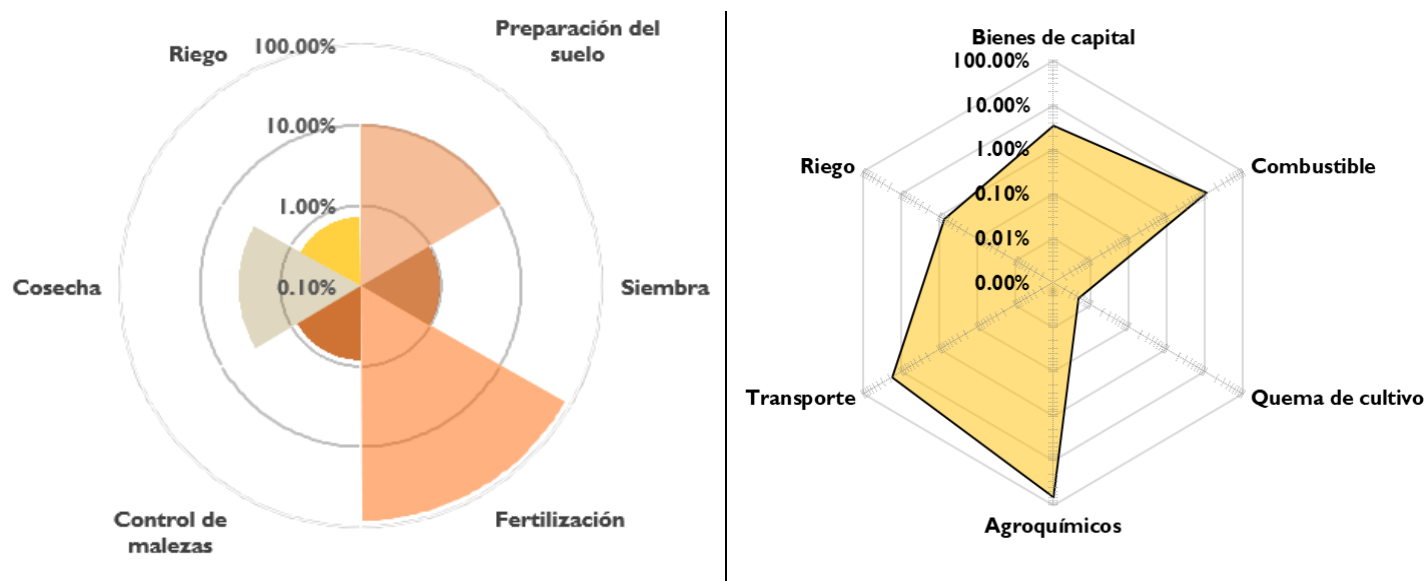


Figura 27. Resultados de la huella de energética por etapa (izquierda) y por operaciones (derecha)

Fuente: Elaboración propia

Por operaciones, la distribución del consumo energético se llevó en primer lugar por la fabricación de productos agroindustriales que se utilizaron en la fertilización y control de maleza, contribuyendo así con 67.35%. Por otro lado, el transporte de dichos insumos representó el 17.35% de la huella energética, seguida por el uso de combustibles con 11.17% consumidos por el uso de tractores y alzadoras y 3.38% por la fabricación de bienes de capital tales como camiones, azadones, machete e infraestructura.

10.8.2. Etapa industrial

Descripción general por proceso

En el siguiente apartado se muestran los resultados de la etapa industrial. Se han clasificado de acuerdo con las operaciones que se realizan dentro del sistema, que corresponden a la recepción de la materia prima, molienda, clarificación, evaporación, cristalización, centrifugación, secado, empackado y calderas. También se agrega un apartado que corresponde a servicios generales que incluye los insumos que no se vincularon a algún equipo mecánico en específico. Los gráficos que se muestran en primer lugar corresponden a los resultados generales para cada huella, enseguida, se acompañan de diagramas generados con el software especializado SimaPro 9.1.1.1, en este, las figuras rectangulares de color verde indican las etapas de estudio; dentro de cada caja se muestra el porcentaje de contribución y el nombre del proceso o equipos analizados. Cuando son de color blanco, indican productos específicos. Las líneas rojas indican la magnitud y dirección del impacto generado. En todos los diagramas, los impactos se muestran de menor a mayor magnitud, desde la parte inferior a la superior de la figura, respectivamente.

Huella de carbono

En la huella de carbono se aportó un total de 0.0190 kg de CO₂ eq por 100 gramos de azúcar producidos, de los cuáles, el área de clarificación contribuyó con 35.23%, seguido por la recepción de la materia prima con 21.69%, 17.44% correspondiente a la molienda y 6.11% a servicios generales. Los impactos se producen debido a los consumos de energía eléctrica que aún provienen de la red eléctrica nacional y a los insumos durante el mantenimiento. Cabe resaltar que, durante la clarificación del jugo se requiere azufre, por lo que su

distribución y consumo, generaron los mayores impactos, mientras que, para el área de molienda, el consumo de óxido de calcio como agente neutralizador para la maquinaria, fue el principal contribuyente.

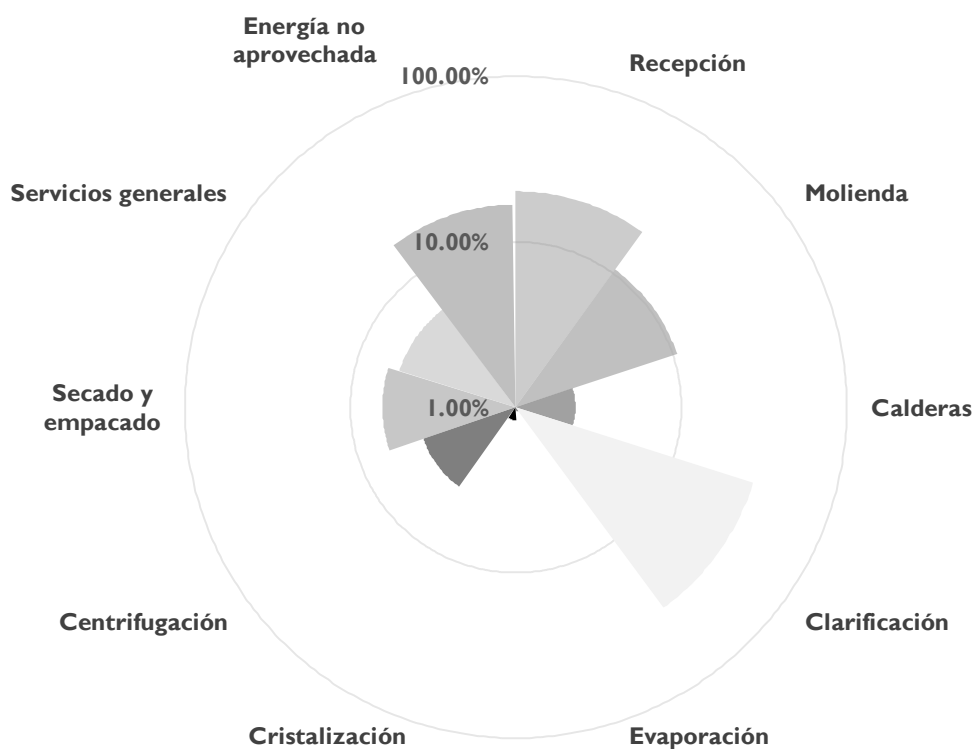


Figura 28. Resultados de la huella de carbono por etapa industrial
Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Figura 29, se muestra la contribución a la huella de carbono por equipo, mostrando los procesos de mayor contribución. Como se mencionó anteriormente, la clarificación contribuyó con 35.23% de los impactos ambientales, del cual 98% de estos impactos se vinculan al consumo de azufre. El 2% restante se atribuye al consumo de hidróxido de calcio, en particular al transporte y la energía eléctrica utilizada para la preparación de la cal hidratada.

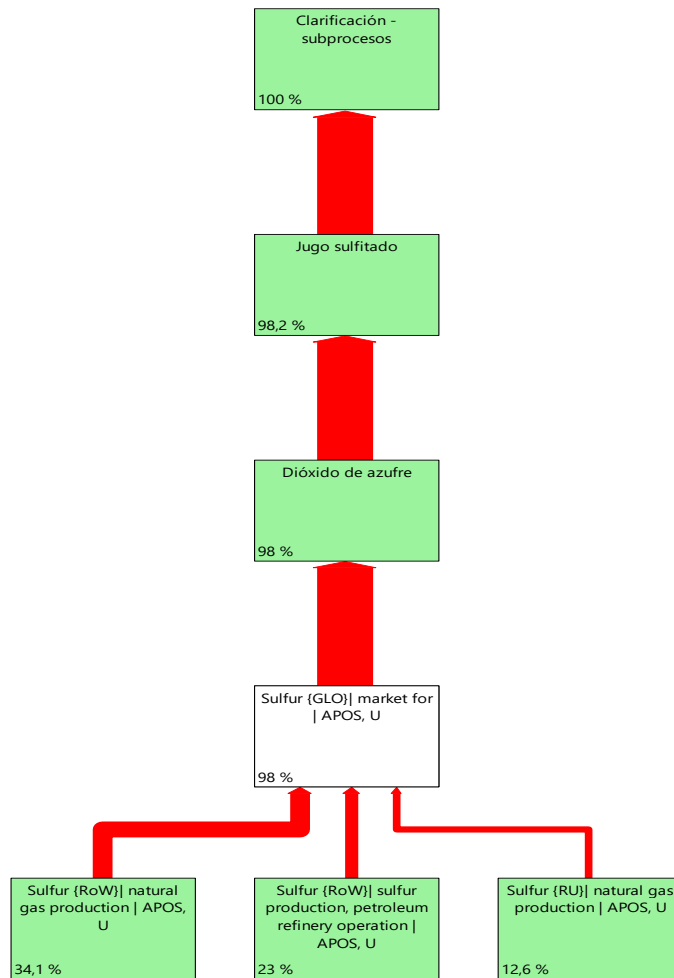


Figura 29. Resultado del diagrama de flujo de la etapa de clarificación

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la recepción de la materia prima (Figura 30), el transporte de caña contribuyó con 51.5% de los impactos para tal subproceso, mientras que el uso de las mesas transportadoras y los conductores de caña aportaron 9.48% y 13.5% respectivamente, mismo que se relaciona con el consumo de energía eléctrica proveniente de la red nacional de electricidad. En la se observa el resultado obtenido en la simulación.

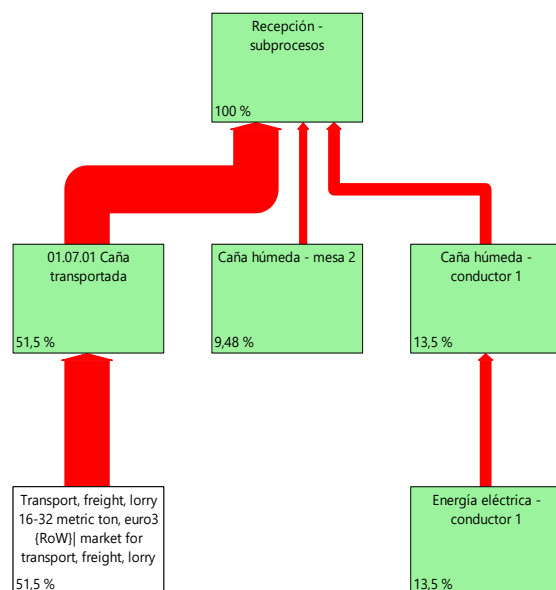


Figura 30. Resultado del diagrama de flujo de la recepción de materia prima
Fuente: Elaboración propia

El tercer mayor contribuyente a la huella de carbono fue la etapa de molienda con 17.44%. De los cuales 31.4% corresponde al aporte dado por el motor que envía el juego mezclado a la etapa de clarificación, 17.3% corresponde al aporte del molino 3 y 14.4% al motor que recolecta el juego recuperado del molino 2. En la Figura 31 se observa el resultado del diagrama para dicha etapa.

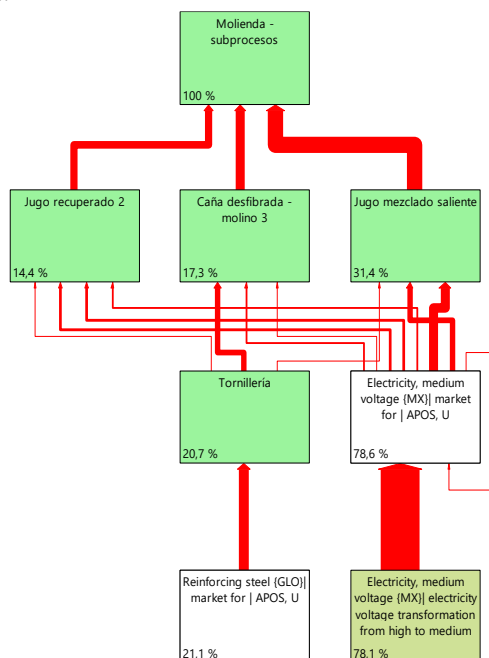


Figura 31. Resultado del diagrama de flujos para la molienda
Fuente: Elaboración propia

Huella de hídrica

Para esta categoría el consumo total de agua fue de 0.004646 m^3 por cada 100 gramos de azúcar producida (Figura 32), siendo la etapa de recepción de la materia prima el principal contribuidor con 87.64%. Es en esta etapa cuando se recibe la materia prima y se debe lavar para que la caña entre libre de tierra, polvo, piedras o cualquier otra impureza que puedan intervenir en los equipos posteriores. Sin embargo, el agua se emite directamente a un efluente natural, conllevando grandes cantidades de materia orgánica, lo que representa un peligro para la vida acuática.

Respecto a 6.47% corresponden a la energía no aprovechada en todo el sistema, en específico a las pérdidas energéticas en calderas y recirculaciones de gases de escape en el área de evaporación y cristalización. Por otro lado, 4.79% corresponde a la fabricación de insumos ocupados durante la etapa de mantenimiento, nuevamente a la producción de óxido de calcio y la extracción del azufre.

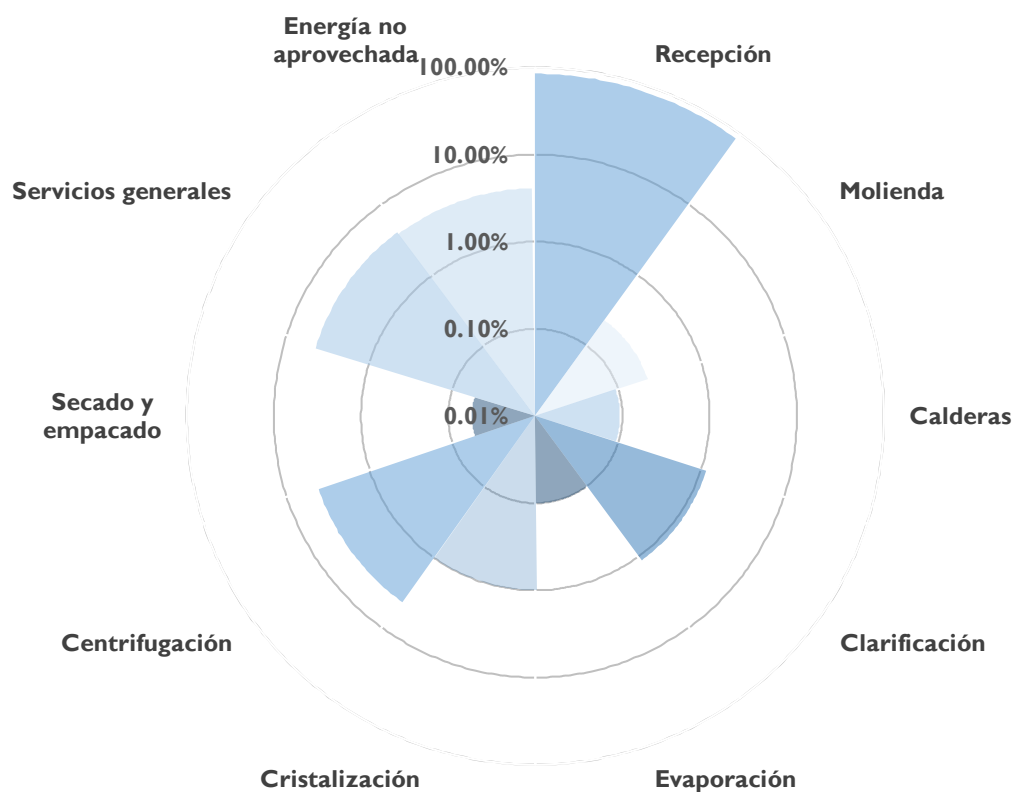


Figura 32. Resultados de la huella de hídrica por etapa industrial
Fuente: Elaboración propia

Respecto a la actividad de mayor contribución a la huella hídrica, fue la etapa de recepción de la materia prima. Esto se debe al consumo de agua para el lavado de la caña previo procesamiento. En este punto se contabilizó más del consumo del 90% del agua total consumida durante las operaciones en fábrica. En la Figura 33 siguiente se muestra el resultado obtenido en la simulación, donde se observa que en las dos mesas de lavado de caña se consume la mayor cantidad de agua.

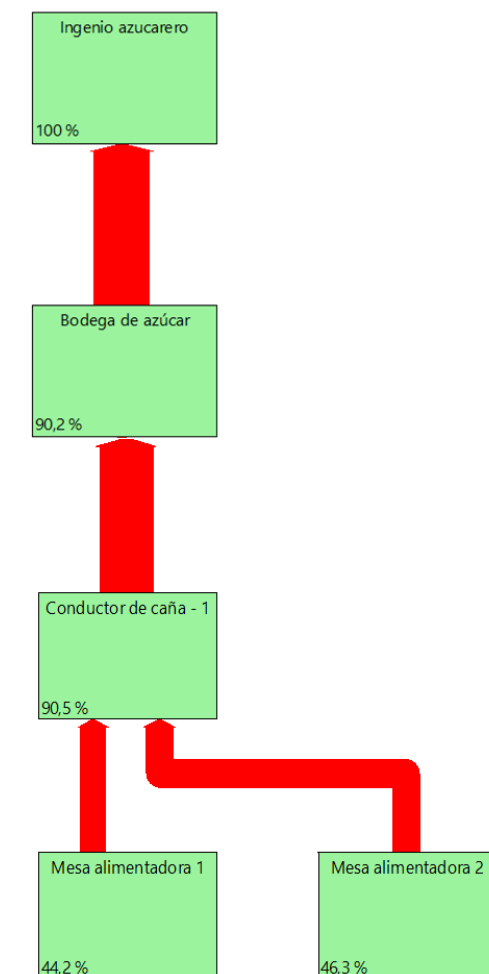


Figura 33. Resultado del diagrama de flujo para la recepción de la materia prima
Fuente: Elaboración propia

Huella energética

Para la huella energética se contabilizó un consumo total de 3.11 MJ por cada 100 gramos de azúcar producida. En la Figura 34 se muestra la distribución por proceso, donde el área de calderas consumió 91.77% de la energía total, mientras que la clarificación aportó 5.71%

relacionados con la fabricación del azufre. El alto consumo energético en el área de calderas se debió a la contabilización del aporte energético que tiene el bagazo al ser utilizado como combustible, es por ello por lo que, del total energético, 75% corresponde a fuente de biomasa, mientras que 24% a fuentes fósiles relacionadas con los procesos productivos de energía eléctrica y la fabricación de insumos para el mantenimiento de la maquinaria. 1% corresponde a la energía proveniente de otros tipos de fuentes que incluyen la nuclear, eólica e hídrica.

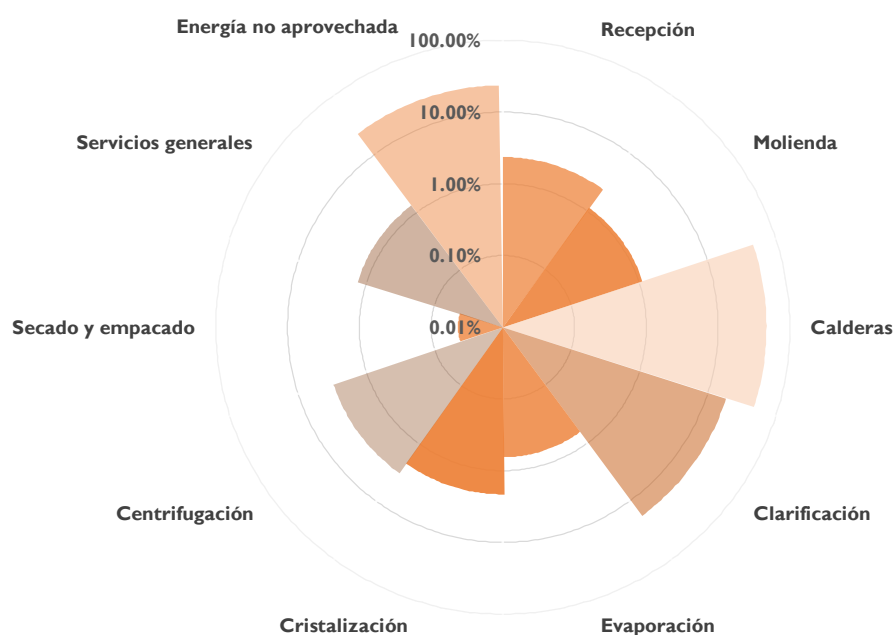


Figura 34. Resultados de la huella de energética por etapa industrial
Fuente: Elaboración propia

Para el caso específico de los dispositivos o subprocesos con mayor contribución para la huella energética se encuentra la energía no aprovechada, como se observa en la Figura 35, 23.6% y 29.9% de los impactos a la huella energética provienen por las ineficiencias en las calderas 1 y 2, mientras que 21.1% y 16.9% de las pérdidas de energía en los evaporadores.

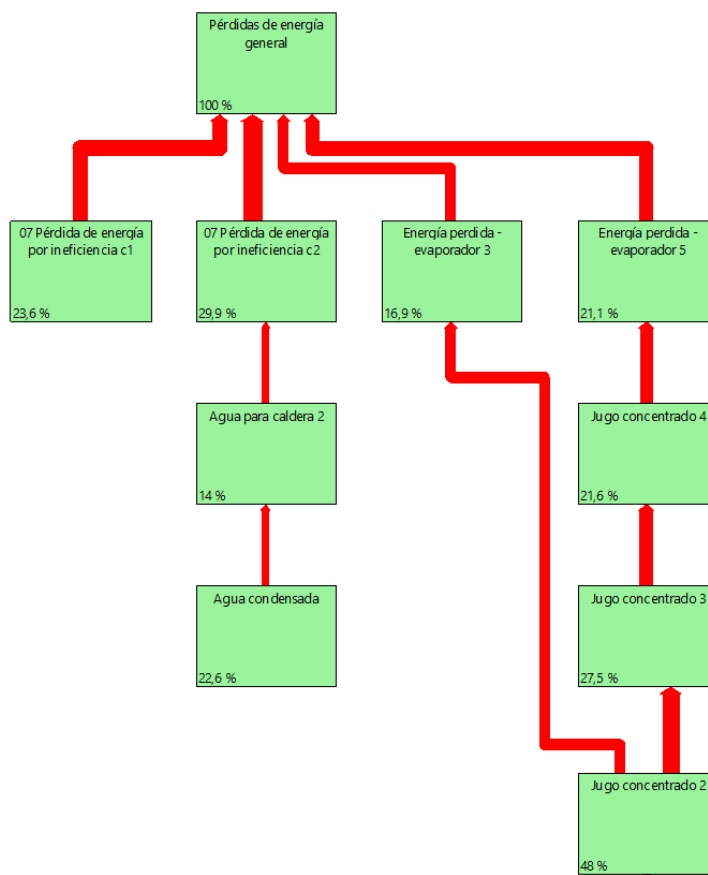


Figura 35. Resultados del diagrama de las pérdidas de energía
Fuente: Elaboración propia

El segundo proceso con mayor contribución fueron las calderas, en la Figura 36 se muestra que, la caldera 2 contribuyó con 63.1% para la huella energética mientras que la caldera 1 con 38.7%. Cabe resaltar que la caldera 2 tiene mayor capacidad de generación de vapor, por lo tanto, el requerimiento de bagazo como combustible es mayor.

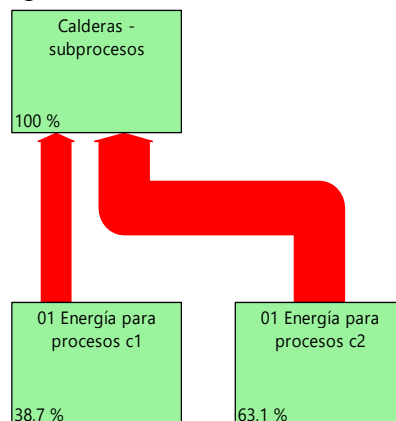


Figura 36. Resultados del diagrama de calderas
Fuente: Elaboración propia

Resultados por subproductos

Los resultados que se presentaron en la sección anterior muestran los impactos ambientales de manera particular por la etapa agrónoma y la etapa industrial. En los siguientes gráficos, se muestran los impactos generados por el producto principal (azúcar) incluyendo tanto la etapa agrónoma como la etapa industrial, así como los subproductos de la producción de azúcar: la cachaza o torta de filtro, la melaza, la energía eléctrica autogenerada y la energía no aprovechada.

Para el caso de la huella de carbono total (Figura 37), se observa que el azúcar contribuye con la mayoría de los impactos ambientales (91.58%), mientras que la melaza y la cachaza con 3.95 y 4.21% respectivamente. Esto es de esperarse ya que la función de la industria azucarera es generar azúcar como valor agregado al cultivo de la caña, mientras que los subproductos generados, aún que tengan aprovechamiento fuera de la planta de producción, no es el objetivo de la cadena productiva.

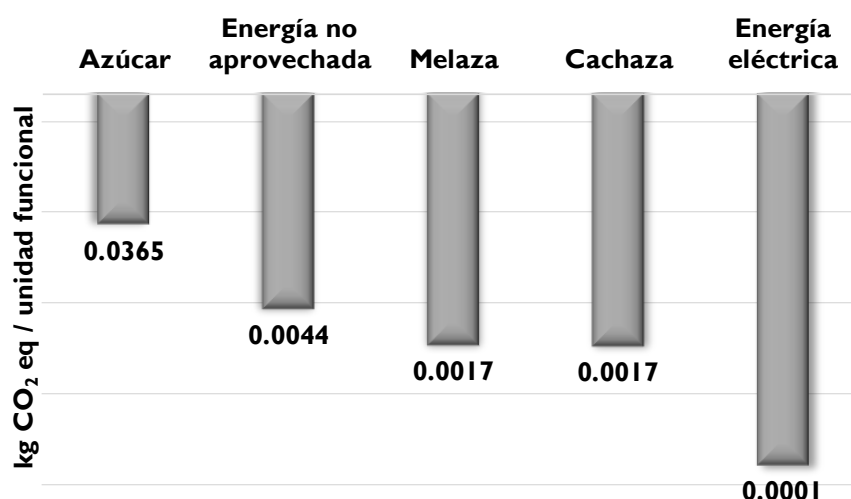


Figura 37. Emisiones atmosféricas por subproductos

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la huella de hídrica (Figura 38), sigue la misma tendencia que la huella de carbono, ya que la cantidad de residuos generados fueron menores al producto principal producido. Además, por la valoración que el mercado les proporciona a los coproductos, es de menor importancia respecto al producto principal. En este caso, también se incluyen los

impactos asociados a la etapa de cultivo de la caña, donde se incluye el agua de riego y el agua para lavado de la caña.

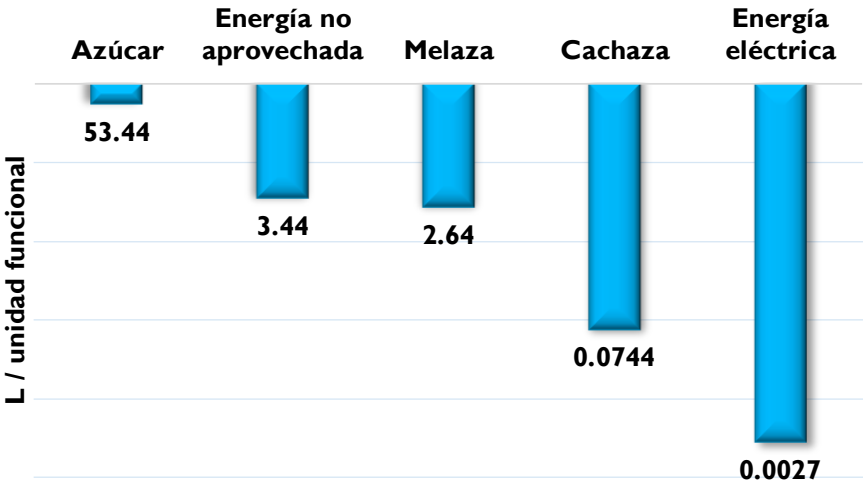


Figura 38. Consumo de agua por subproducto
Fuente: Elaboración propia

Para la huella energética, el resultado sigue la misma tendencia respecto a la huella de carbono e hídrica, por lo que cuenta con una explicación similar a los impactos generados por el producto principal. En esta huella, también se obtuvo de manera particular los impactos generados por el autoabastecimiento de energía eléctrica dentro de la fábrica. Sin embargo, al ser una de consumo energético menor al 1%, no se consideró agregarlo en la Figura 39.

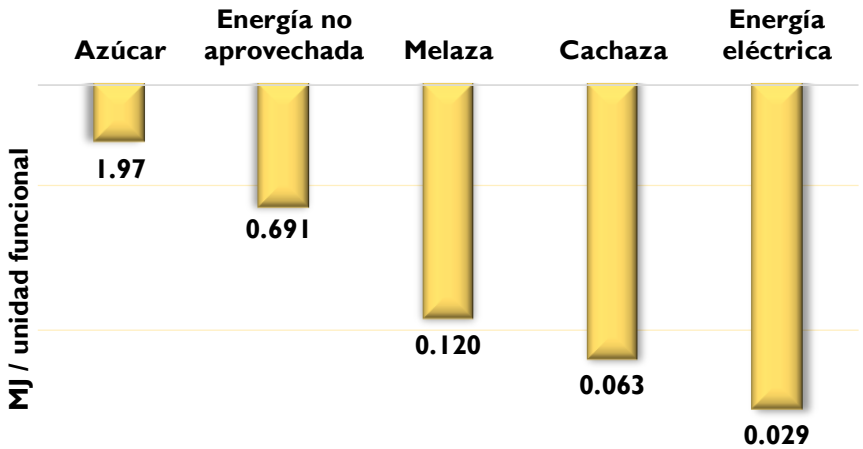


Figura 39. Consumo de energía por subproducto
Fuente: Elaboración propia

9.8 Comparación de la energía eléctrica autogenerada

Actualmente la fábrica de azúcar tiene un autoabastecimiento de energía eléctrica de alrededor del 70%. Es por ello por lo que es importante mencionar los beneficios ambientales que tiene el ingenio por no consumir energía eléctrica de la red nacional de electricidad en su totalidad. En la figura 33, se muestra una comparación del estado actual respecto a la huella de carbono, total en un escenario donde no existiera autoabastecimiento.

Para el caso de la huella de carbono, en la Figura 40 se aprecian los impactos positivos que actualmente tiene el ingenio azucarero (cogeneración). Los beneficios de utilizar el bagazo de caña como combustible, se refleja directamente en la huella de carbono, puesto que se evita el consumo del 70% de energía eléctrica desde una fuente externa y por tanto, esta no se vincula con los procesos de generación de electricidad que, para el caso de México, las principales fuentes de energía eléctrica son el carbón, gas natural, petróleo, nuclear (90% de la producción nacional) y en menor medida fuentes renovables (10%) (Secretaría de Energía, 2023).

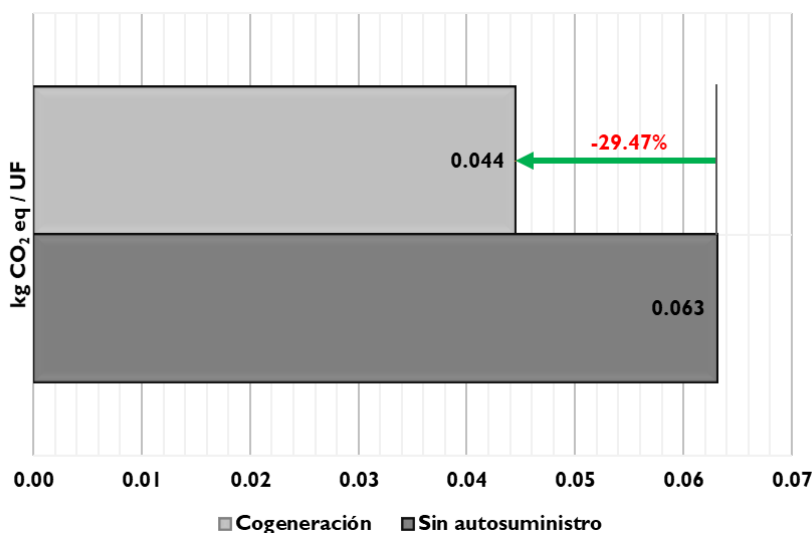


Figura 40. Comparación de los impactos totales del sistema con y sin generación de energía eléctrica

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la huella hídrica, hubo un decremento del consumo total de agua. Aunque dicha disminución represente 0.57%, esta se relaciona con el consumo de agua que se realiza

en la fábrica para el lavado de la caña, respecto a la cantidad de agua que se necesita para la generación de energía eléctrica externa, tales como las plantas hidroeléctricas. Una diferencia casi imperceptible pero que aun así puede tener importancia en el análisis de los datos debido a que el agua es un bien escaso, sin embargo, hay que comparar otros beneficios como la huella de carbono y la energética respecto a la toma de cualquier decisión.

Respecto a la huella energética, con un suministro de autogeneración de electricidad, el consumo energético total es más bajo respecto a un consumo total de energía eléctrica externa. Sin embargo, nuevamente la variación representa solo el 2%, por lo que al consumo energético se refiere, el sistema puede funcionar con cualquiera de las dos fuentes de energía. Teniendo en cuenta lo anterior, aunque para la huella hídrica y energética no exista variación significativa entre el tipo de fuente de electricidad, si lo es para la huella de carbono y aún más para el factor económico y la gestión de los residuos sólidos en un escenario donde no existiese el aprovechamiento del bagazo como fuente de energía. Por lo que respecta a los beneficios que el ingenio tiene actualmente, se puede remarcar que la descarbonización del sistema comprueba una solución energética más sostenible y limpia, que también se alinea con los principios de la ecología industrial al cerrar los ciclos de materiales y energía, reducir desperdicios y contribuir a un modelo industrial más circular y amigable con el medio ambiente.

9.9 Análisis de sensibilidad

En esta sección se presentan los resultados del análisis de sensibilidad. Se ha elegido la huella de carbono por su importancia respecto al cambio climático, la regulación y normatividad. Al mismo tiempo, se puede utilizar la información para que la empresa pueda demostrar su compromiso ambiental y pueda reflejarlo en sus consumidores y atraer nuevos clientes.

En la Figura 41 se muestran las emisiones generadas al utilizar la biomasa como fuente de energía respecto a otros combustibles. Al sustituir el tipo de combustible, considerando que se requiere la misma cantidad de energía, se puede observar el incremento de las emisiones debido al origen de la fuente energética. En los dos primeros casos, el carbón

y petróleo contienen una mayor proporción de carbono en comparación con el gas natural y la biomasa, que, cuando se queman, producen dióxido de carbono (CO_2), que es uno de los principales gases de efecto invernadero responsables del cambio climático. Por otra parte, el gas natural contiene menos carbono y, por lo tanto, produce menos CO_2 por unidad de energía generada en comparación con el carbón y el petróleo. Además del CO_2 , el carbón y el petróleo también emiten otros contaminantes dañinos durante la combustión, como dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas finas y compuestos orgánicos volátiles. Estos contaminantes pueden contribuir a problemas de calidad del aire, lluvia ácida y problemas de salud pública, como enfermedades respiratorias.

Por otra parte, el uso del bagazo como fuente energética en este sistema, refuerza el concepto de “sustitución de combustibles” concernientes a la ecología industrial y la economía circular. Ya que el objetivo de estas es lograr el desarrollo sostenible, que, para este caso, queda comprobando las ventajas de utilizar un subproducto de la propia producción de azúcar evitando así el consumo de otras fuentes más contaminantes y caras y la emisión de contaminantes contribuyentes al cambio climático.

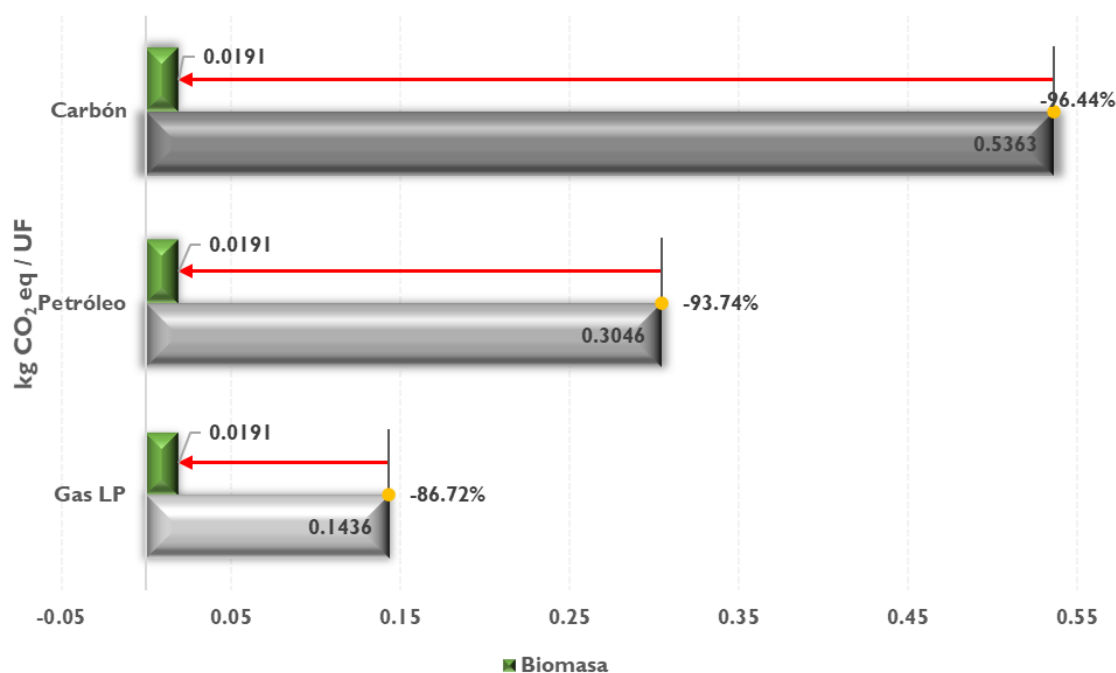


Figura 41. Variación de la huella de carbono respecto a otros combustibles
Fuente: Elaboración propia

Otro parámetro de importancia que se consideró para realizar el análisis de sensibilidad fue la reducción de la humedad del bagazo. Se realizó una estimación de la energía contenida en los gases de combustión, la cantidad disponible para utilizarla como fuente de calor para disminuir la humedad del bagazo y una proyección de la energía eléctrica que se pudiese producir para abastecer por completo el consumo interno y su retorno a la red eléctrica nacional en caso de excedentes. Por lo tanto, al tomar en cuenta los parámetros anteriores, también se consideró el comportamiento de la emisión de gases contaminantes y el efecto en la huella de carbono.

En la Figura 42 se observa que, al disminuir el contenido de humedad del combustible desde 50% a 45% existe una disminución gradual de los impactos, esto se debe a que, al tener mayor energía disponible, se puede generar más vapor para usarse en la planta generadora de energía eléctrica, misma que se destinaría al abastecimiento interno, pasando de 69% de energía autogenerada, a 100%, eliminando los requerimientos de compra a la red eléctrica pública. Además, si se lograra disminuir la humedad por debajo al 45%, se tendría más energía disponible para operar con excedentes de producción de energía eléctrica, lo que beneficiaría la huella de carbono global de la fábrica, ya que se estaría produciendo electricidad, a partir de un residuo agroindustrial y no de una fuente de fósil. También se encontró que al disminuir la humedad hasta 28.4%, habría ya impactos positivos al compensar los generados en otras etapas durante la producción de azúcar, sin embargo, a partir del 30% de humedad, el requerimiento energético los gases de combustión sería mayor, por lo que indirectamente se tendría que adquirir más bagazo del que se produce en la molienda.

A pesar de que las proyecciones sean positivas, es importante realizar estudios profundos de los aspectos relacionados a la humedad y cómo configurar un sistema de secador funcional para recuperar la mayor cantidad de energía en los gases de combustión previa descarga atmosférica, así como la variabilidad en el contenido de humedad del bagazo puede afectar la estabilidad y confiabilidad del proceso, estudios detallados son requeridos para que ayuden a prever cambios en la humedad y desarrollar estrategias de manejo para

garantizar una operación constante sin dejar pasar un adecuado almacenamiento y manipulación del bagazo, ya que son esenciales para prevenir la absorción de humedad, por lo que también son necesarias investigaciones sobre técnicas de almacenamiento que minimicen la exposición del bagazo a la humedad ambiental. Por otra parte, se debe tener en cuenta la capacidad operativa de los dispositivos actuales y la factibilidad económica que representaría sustituir por uno nuevo, tomando en cuenta el tiempo de vida útil de la fábrica, la capacidad operativa y aspectos legales para el retorno de energía eléctrica a la red pública.

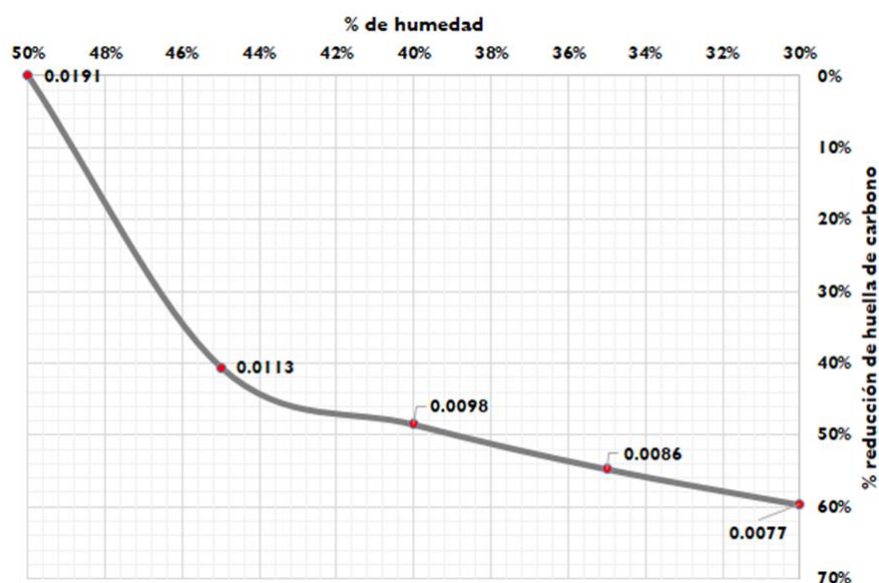


Figura 42. Variación de la huella de carbono respecto al contenido de humedad del bagazo
Fuente: Elaboración propia

10.9. Descripción global de los impactos totales

En este apartado se interpretan los resultados respecto a la situación actual de México y otros productos alimenticios básicos en la alimentación nacional comparando las huellas de carbono y la huella hídrica. En primer lugar, de acuerdo con el tercer informe sobre cambio climático en México, se cuenta con una emisión total de contaminación de 736,629,570 toneladas de CO₂ eq., (Figura 43) de los cuáles, el estado de Veracruz tiene una participación del 9%. Dentro de dicho contexto, el sitio de estudio emitió la cantidad de 21,342 ton de CO₂ eq., lo que representa 0.03% de las emisiones totales anuales en el estado. Si se toma en cuenta los ingenios azucareros operando en el estado, se tendría una emisión de 903,817 ton

de CO₂ eq., representando con ello 1.36% de participación en la contaminación estatal. Por otra parte, en el ámbito industrial nacional, las empresas productoras emitieron la cantidad de 73,672,410 ton de CO₂ eq., de los cuáles, la participación de todas las fábricas de azúcar en México representa 3.34% del sector industrial y 0.37% del total nacional.

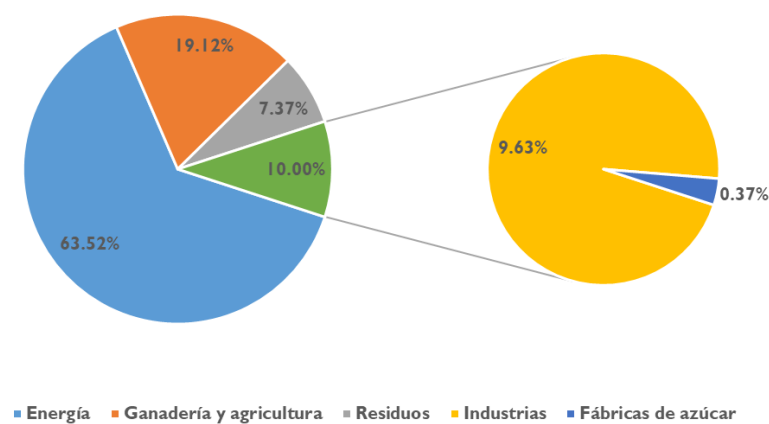


Figura 43. Participación del sector azucarero en las emisiones generadas en México
Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 44, el consumo anual de azúcar por habitante en México se encuentra por arriba de las emisiones totales por el consumo de frijol, pero más baja que por el consumo de café, tomate y huevo. Con ello, si una persona quisiera reducir su huella de carbono a través de los productos comparados, tendría que disminuir el consumo de 24 kg a 3 kg de huevo, de 13 kg a 7 kg de tomate y de 0.8 kg a 0.5 kg de café.

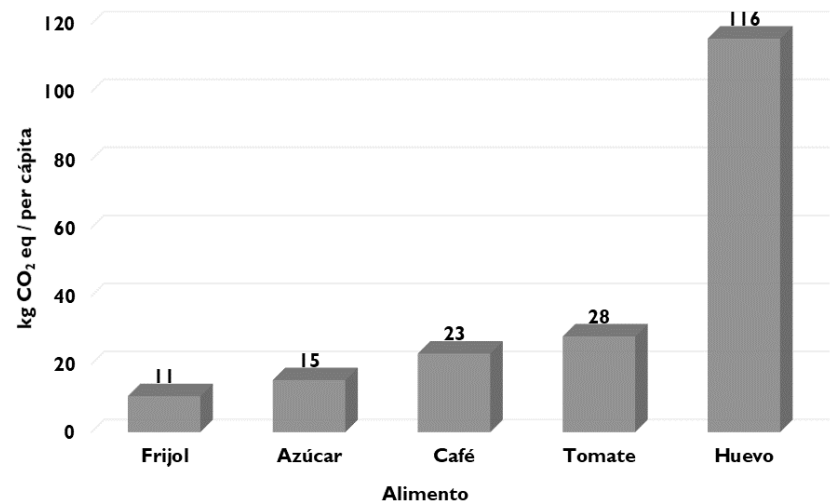


Figura 44. Emisión anual de gases efecto invernadero de alimentos de consumo básico.
Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, el consumo del agua per cápita anual por producto alimenticio se representa en la Figura 45. Se muestra que el consumo de agua por el azúcar consumido por un habitante en México se encuentra menor por lo que consume en huevo de gallina o en leche de vaca. Estas diferencias se deben tanto a los procesos de producción vinculados a cada alimento, así como a las cantidades de consumo de cada una. Como en el caso anterior, para reducir el consumo de agua de manera indirecta por medio de los alimentos e igualar al impacto del azúcar, se tendrían que reducir el consumo de 124 a 20 litros de leche y de 24 a 6 kg de huevo de gallina.

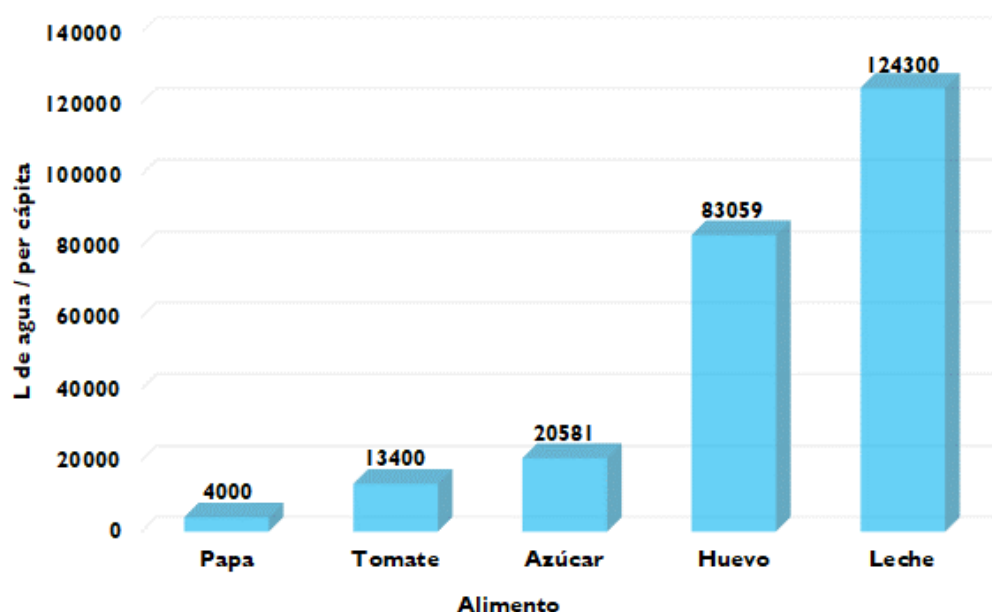


Figura 45. Consumo anual de agua de diversos alimentos de consumo básico.
Fuente: Elaboración propia

Respecto a la huella energética, se encontró que al consumir el promedio nacional por habitante equivaldría lo mismo a utilizar 1 tanque de gas convencional mediano, a recorrer en automóvil 600 km, dejar encendido un foco ahorrador durante 34 años o que 100 personas participen en un maratón diario durante dos años. Además, en la Figura 46 se aprecia la comparación entre las distintas fuentes de energía primaria que se obtienen para la generación de energía en México, versus a los tipos de energía utilizados para la fabricación de azúcar. La diferencia notable radica a que, gracias a la utilización del bagazo como combustible, se evita el consumo de otros combustibles fósiles, como se demostró en el análisis de sensibilidad.

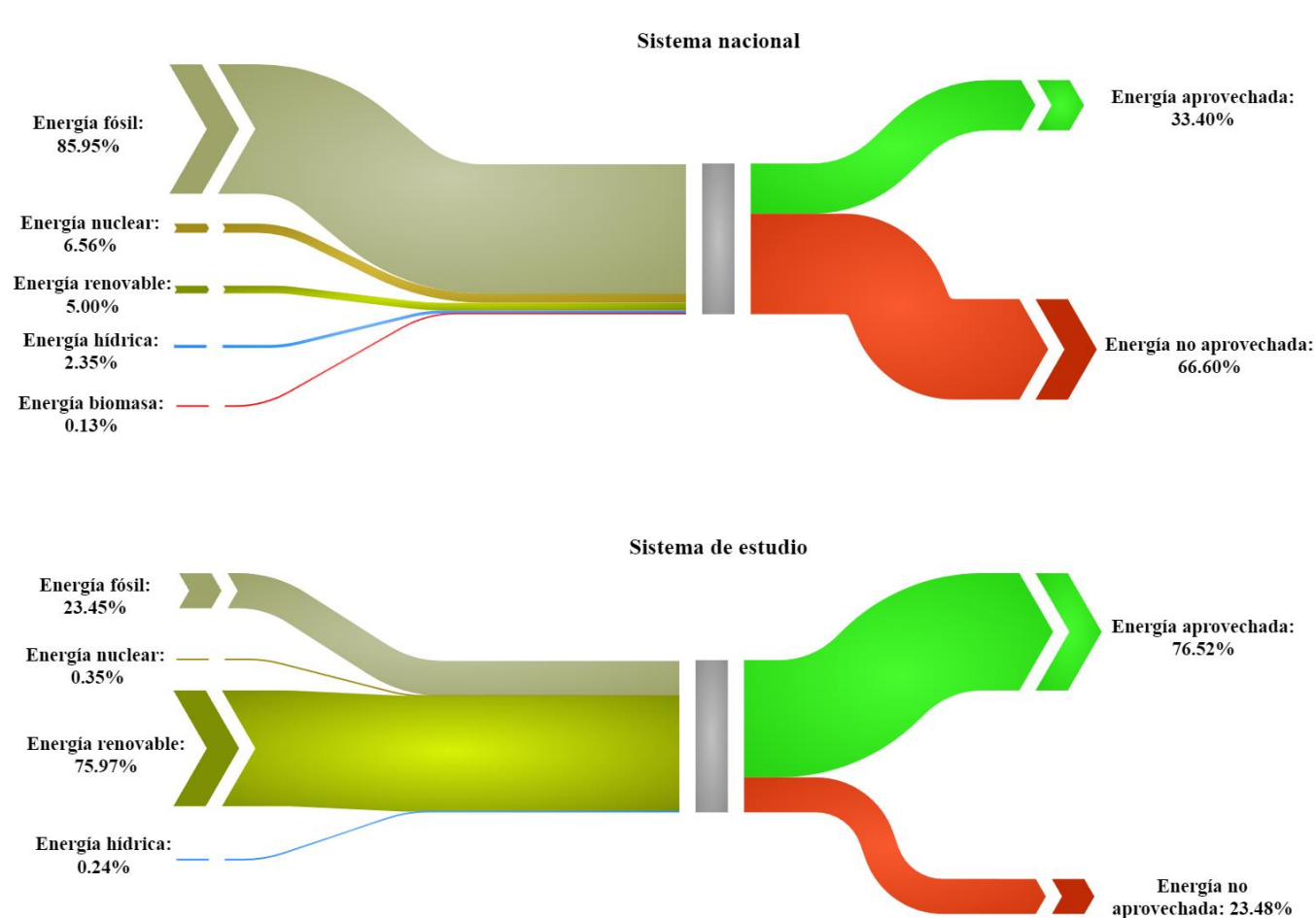


Figura 46. Comparación del consumo por tipo de fuente utilizada para la generación de energía en el sistema nacional (arriba) y el caso de estudio (abajo).

Fuente: Elaboración propia

XII. Conclusiones

Durante el transcurso de este proyecto, se llevó a cabo una exhaustiva evaluación del rendimiento ambiental asociado al cultivo de caña y a la extracción de azúcar. Se basó en la metodología del análisis de ciclo de vida a través de la medición de las huellas paramétricas de carbono, hídrica y energética. El objetivo fue discernir el grado de contribución de cada fase del proceso a los impactos medioambientales vinculados a la producción de 100 gramos de azúcar, correspondiente al consumo diario per cápita en México. La elección de esta unidad funcional se llevó a cabo con el propósito de contextualizar la demanda existente de azúcar, el cual forma parte de la canasta básica del mexicano. Este enfoque permitió no solo evaluar de manera detallada los aspectos ambientales del proceso, sino también comprender su relevancia directa en términos de consumo diario, contribuyendo así a una visión más completa y aplicable de la sostenibilidad del cultivo de caña y la producción de azúcar en México.

Un aspecto que merece especial atención, en comparación con otros estudios de objetivos similares, radica en el nivel de minuciosidad que se presenta en este trabajo. A diferencia de otras investigaciones donde se presentan magnitudes de impactos ambientales asociados a las etapas agrónoma e industrial, cabe destacar que dichas investigaciones no mencionan de manera específica los impactos ambientales inherentes a cada dispositivo del proceso. Asimismo, se observa un nivel de detalle en la consideración de insumos y transporte, particularmente en lo que respecta a los meses de operación y mantenimiento general. Este enfoque riguroso y detallado fortalece la integridad y la relevancia de los hallazgos presentados en el presente estudio.

Se destaca la trascendencia de la creación del inventario del ciclo de vida, dado que la ausencia de un registro detallado de los productos que ingresan y egresan del sistema productivo obstaculizaría la comprensión de los impactos ambientales inherentes al producto bajo análisis. Este ejercicio posibilitó, de manera concluyente, adquirir una comprensión profunda del estado operativo actual de todos los equipos en funcionamiento dentro de la instalación, destacando las calderas en la operación integral de la planta.

Mediante el análisis del balance de materia y energía en la fase de producción de vapor, se identificaron oportunidades significativas para mejorar la recuperación de energía, lo cual conllevaría un incremento sustancial en la eficiencia energética de la fábrica. Este aumento en el rendimiento energético, vinculado de manera directa a una disminución de los impactos ambientales, constituye un aspecto de gran relevancia. El inventario del ciclo de vida también permitió conocer sobre los impactos ambientales mitigados gracias a la elección del bagazo de caña como fuente de combustible en lugar de los combustibles fósiles, que poseen un potencial perjudicial y contribuyen al cambio climático de manera más acelerada que un residuo orgánico propio del sistema. Este discernimiento contribuye significativamente a una gestión más sustentable y eficaz de los recursos energéticos, consolidando así la base para futuras mejoras operativas y ambientales en la instalación.

XIII. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se plantean las siguientes recomendaciones con el propósito de profundizar en las medidas de los impactos ambientales y mejorar el desempeño ambiental del proceso de cultivo y producción de azúcar del Ingenio Mahuixtlán.

Para la etapa agrónoma:

- Contar con un manejo adecuado de los residuos sólidos generados por el uso de productos agroquímicos, ya que, en gran parte de los terrenos visitados, se encontraron restos de ellos dispersos entre las parcelas.
- Monitorear constantemente el tiempo de riego de los cañales para evitar inundaciones y su desperdicio, ya que esta se pudiera aprovechar en otros terrenos.
- Realizar estudios a mayor detalle para conocer el comportamiento de los ingredientes activos de los productos agroquímicos utilizados y conocer su ciclo de vida cuando este no es aprovechado por la planta de caña, y cuáles son las repercusiones que tiene a corto, mediano y largo plazo.
- Realizar estudios completos respecto al aporte de nutrientes de la cachaza generada para su aprovechamiento en los campos de cultivo, posteriormente realizar estudios sobre la disminución de los impactos ambientales al disminuir el consumo de fertilizantes sintéticos.

Para la etapa industrial:

- Establecer formatos con mayor detalle de especificidad para el uso o consumo de refacciones o materiales para el uso específico de cada equipo, ya que, en esta ocasión, la detección particular de cada uno no fue completa, sin embargo, en muchos

casos si se lograron identificar los dispositivos industriales que recibieron de manera exacta cada insumo.

- Contar con un sistema de tratamiento de agua con el fin de aprovechar aún más el agua utilizada para el lavado de la caña.
- Realizar un estudio profundo respecto al secado de la caña con los gases de combustión generados por la propia caldera. En este caso se mostró que es posible reducir la cantidad de humedad previa entrada a los quemadores, sin embargo, hay que analizar detalladamente la factibilidad técnica y económica de la planta.

Finalmente se recomienda realizar una evaluación adicional para las etapas de refinación, distribución y consumo por la población, para que el estudio sea considerado de la cuna a la tumba. Que incluya el estudio de las rutas de distribución y como aportan a la huella de carbono y la gestión de los residuos sólidos generados por los usuarios finales.

XIV. Referencias

- A. J. Huijbregts, M., J. N. Steinmann, Z., M.F. Elshout, P., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal Life Cycle Assessment*, 22, 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- AEMP. (2010). *Cadena Productiva del Azúcar*.
- AFF. (2014). *Production Guideline - Sugarcane*. Department of Agriculture, Forestry and Fisheries.
- Aguilar Rivera, N. (2014). Reconversión de la cadena agroindustrial de la caña de azúcar en Veracruz México. *Nova scientia*, 6(12), 125–161.
- Aguilar Rivera, N., & Fernandez Juarez, E. del C. (2021). *Análisis de marcos de sostenibilidad de la agroindustria azucarera mexicana*. Análisis de marcos de sostenibilidad de la agroindustria azucarera mexicana. <https://atamexico.com.mx/noticia-de-interes/analisis-de-marcos-de-sostenibilidad-de-la-agroindustria-azucarera-mexicana/>
- Aguilar-Rivera, N., & Espinosa-López, R. A. (2014). Análisis de la capacidad de diversificación de zonas productoras de caña de azúcar por metodologías Emergy, análisis de ciclo de vida y evaluación multicriterio. *Revista Centro Azúcar*, 41(1).
- Arellano, C. (2023). *Entrevista a productor de caña*.
- Arguedas Sánchez, D. (2018). *Efectos del sistema de riego por tubería flexible de polietileno y canales abiertos sobre la erosión del suelo en el cultivo de caña de azúcar (Saccharum officinarum)*.
- Arroniz, I. V., & Barroso, L. A. (2013). Contaminación ambiental por quema de caña de azúcar: Un estudio exploratorio en la región central del estado de Veracruz. *Memoria de ponencias Think Green 2013*.
- Astrom, T. (2005). Maintenance and overhaul steam turbines. *International association of engineering insurers 38th annual conference*.
- Azevedo, P., Souza, C., da Silva, B., & da Silva, V. (2007). Water requeriments of pineapple crop grown in a tropical environment, Brazil. *Agricultural Water Management*, 88, 201–208.
- Baikow, V. E. (2013). *Manufacture and refining of raw cane sugar*. Elsevier.
- Becoña, G. (2015). *El rol de la evaluación del ciclo de vida en los productos agropecuarios y sus avances a nivel mundial*.
- Berger, M., van der Ent, R., Eisner, S., Bach, V., & Finkbeiner, M. (2014). Water Accounting and Vulnerability Evaluation (WAVE): Considering Atmospheric Evaporation Recycling and the Risk of Freshwater Depletion in Water Footprinting. *Environmental*

- Birru, E. (2016). *Sugar cane industry overview and energy efficiency considerations*.
- Bordonal, R. de O., Carvalho, J. L. N., Lal, R., de Figueiredo, E. B., de Oliveira, B. G., & La Scala, N. (2018). Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38, 1–23.
- Browne, M., Rizet, C., Anderson, S., Allen, J., & Keita, B. (2005). Life cycle assessment in the supply chain: a review and case study. *Transport Reviews*, 25(6), 761–782.
- Bustamante Lara, T. I., & Alvarado Silva, A. (2022). Análisis de la especialización de la caña de azúcar en México, 1980-2017. *Revista de El Colegio de San Luis*, 12(23 SE-Artículos), 1–31. <https://doi.org/10.21696/rcs1122320221392>
- Campos, H. (2022). *Comunicación personal*, 02 de febrero.
- Cárcamo, E. A. B., & Peñabaena-Niebles, R. (2022). Opportunities and challenges for the waste management in emerging and frontier countries through industrial symbiosis. *Journal of Cleaner Production*, 132607.
- Cardoso, T. F., Watanabe, M. D. B., Souza, A., Chagas, M. F., Cavalett, O., Morais, E. R., Nogueira, L. A. H., Leal, M. R. L. V., Braunbeck, O. A., & Cortez, L. A. B. (2018). Economic, environmental, and social impacts of different sugarcane production systems. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 12(1), 68–82.
- Carr, M. K. V., & Knox, J. W. (2011). The water relations and irrigation requirements of sugar cane (*Saccharum officinarum*): a review. *Experimental Agriculture*, 47(1), 1–25.
- CENGICANA. (2017). *Guía de Buenas Prácticas Agrícolas en Caña de Azúcar*.
- Centeno-González, F. O., Lora, E. E. S., Nova, H. F. V., Neto, L. J. M., Reyes, A. M. M., Ratner, A., & Ghamari, M. (2017). CFD modeling of combustion of sugarcane bagasse in an industrial boiler. *Fuel*, 193, 31–38.
- Chandra, V. V., Hemstock, S. L., Mwabonje, O. N., De Ramon N'Yeurt, A., & Woods, J. (2018). Life cycle assessment of sugarcane growing process in Fiji. *Sugar Tech*, 20, 692–699.
- Chantasiriwan, S. (2019). Effects of heating surface areas on the performance of bagasse boiler. *Chemical Engineering Transactions*, 74, 139–144.
- Cheesman, O. D. (2004). *Environmental Impacts of Sugar Production The Cultivation and Processing of Sugarcane and Sugar Beet*. CABI.
- Chohfi, F. M., Dupas, F. A., & Lora, E. E. S. (2004). Balanço, análise de emissão e seqüestro de CO₂ na geração de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro. *Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural*.
- Colorado, E. (2023). *Comunicación personal*, 20 de febrero.
- CONADESUCA. (2016). *Nuevas variedades de caña de azúcar*.

- CONADESUCA (Comité Nacional para el Desarrollo sustentable de la Caña de Azúcar). (2015). *Ficha técnica del cultivo de la caña de azúcar (Saccharum officinarum L.)*. Gobierno de México MEX.
- CONADESUCA/SADER. (2024). *Reportes - Fábrica, Dato Acumulado*.
- Cordoba, T. (2023). *Comunicación personal, 01 de marzo*.
- Correa, E. C., & García, G. G. (2014). Identificación y cuantificación de pérdidas de sacarosa en el efluente final del proceso de elaboración de azúcar en el ingenio azucarero Riopaila Castilla (planta Castilla). *Ingeniería Solidaria*, 10(17), 83–91.
- Cortéz, M. (2023). *Comunicación personal, 08 de marzo*.
- Cruz, R., Palomeque, D., Núñez, O., & Sapans, O. (2013). Desempeño de la caña de azúcar bajo diferentes distancias de Siembra que mejoran el tráfico dentro del cultivo. *Memorias III Congreso AETA (Septiembre 18-20)*. Guayaquil, Ecuador.
- De la Rosa, I. (2023). *Entrevista directa en área de batey y molinos*.
- de la Vequia, H. D. (2017). EFICIENCIA EN EL USO DE COMBUSTIBLE PARA LA PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum spp.*) EN LA REGIÓN GOLFO DE MÉXICO. *Agro Productividad*, 10(11).
- Díaz, A., & Iglesias Coronel, C. E. (2014). Determinación de las propiedades físico-mecánicas de la caña de azúcar como objeto de la extracción de su jugo para la producción de panela. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(2), 18–22.
- Díaz, F. (2023). *Comunicación personal, 05 de septiembre*.
- Díaz, I. (2022). *Comunicación personal, 15 de marzo*.
- Díaz, J. (2023). *Comunicación personal, 02 de agosto*.
- Díaz, L. D., & Gradaille, L. A. D. (2019). Evaluation of Operation Indicators in Sugarcane Discharge Process. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28(1), 1–8.
- Dlugokencky, E., & Houweling, S. (2015). CHEMISTRY OF THE ATMOSPHERE | Methane. En G. R. North, J. Pyle, & F. Zhang (Eds.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)* (Second Edi, pp. 363–371). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00223-1>
- Domínguez-Domínguez, M. M., Álvarez-Castillo, A., Granados-Baeza, M., & Hernández-Campos, F. (2012). Estudio de la cinética del pretratamiento e hidrólisis ácida del bagazo de caña de azúcar. *Revista Iberoamericana de polímeros*, 13(4), 200–211.
- dos Santos Penteado Soares, C. C., Okuno, F. M., Garbellini Duft, D., Carvalho, D. J., Morandi, J., Guizelini Júnior, P. C., Trez, C. R., Mantelatto, P. E., & Lima Verde Leal, M. R. (2019). Commercial sugarcane dry cleaning systems in Brazil: Progress and challenges. *BioEnergy Research*, 12, 920–929.
- DSD (Department of Agriculture and Farmer's Welfare). (2020). *Glimpses of Sugarcane Cultivation*. Government of India.

- Duarte-Álvarez, O.-J., & Gonzalez-Villalba, J.-D. (2019). *Guía Técnica Cultivo de Caña de Azúcar* (p. 44). FCA, UNA.
- Espinosa, H. A. M. (2009). Los contaminantes en el cultivo e industrialización de la caña de azúcar. *Agro Productividad*, 2(1).
- European Commission. (2017). *Life Cycle Impact Assessment*. Life Cycle Impact Assessment. http://eplca.jrc.ec.europa.eu/?page_id=1159
- EUSKADI. (2009). *Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono*. Ihobe.
- Farkavcova, V. G., Rieckhof, R., & Guenther, E. (2018). Expanding knowledge on environmental impacts of transport processes for more sustainable supply chain decisions: A case study using life cycle assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 68–83.
- FEC. (2018). *Life Cycle Environmental Impacts Study for Europe, Middle East and Africa (AMEA)*.
- Flores-Jiménez, D. E., Carbajal, N., Algara-Siller, M., Aguilar-Rivera, N., Álvarez-Fuentes, G., Ávila-Galarza, A., & García, A. R. (2019). Atmospheric dispersion of methane emissions from sugarcane burning in Mexico. *Environmental Pollution*, 250, 922–933.
- Franck Colombres, F. J., Golato, M. A., Morales, W. D., Aso, G., & Paz, D. (2010). Monitoreo de un sistema de secado de bagazo acoplado a una caldera en un ingenio de México. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, 87(2), 33–44.
- Frenzel, S. (2020). Crystallization schemes in the sugar industry. *ChemBioEng Reviews*, 7(5), 159–166.
- Gasca, M. C., Camargo, L. L., & Medina, B. (2017). Sistema para evaluar la confiabilidad de equipos críticos en el sector industrial. *Información tecnológica*, 28(4), 111–124.
- Go, A. W., & Conag, A. T. (2019). Utilizing sugarcane leaves/straws as source of bioenergy in the Philippines: A case in the Visayas Region. *Renewable energy*, 132, 1230–1237.
- Golato, M. (2014). *Sistema de control en cocimientos de azúcar*. Cátedra de sistemas de control, Universidad Nacional de Tucumán, Ingeniería
- Guilharduci, V. V. da S., Martelli, P. B., & Gorgulho, H. de F. (2017). Efficiency of sugarcane bagasse-based sorbents for oil removal from engine washing wastewater. *Water Science and Technology*, 75(1), 173–181.
- Gunarathna, M., Sakai, K., Nakandakari, T., Momii, K., Onodera, T., Kaneshiro, H., Uehara, H., & Wakasugi, K. (2018). Optimized subsurface irrigation system: the future of sugarcane irrigation. *Water*, 10(3), 314.
- Gunawan, Bantacut, T., Romli, M., & Noor, E. (2019). Life cycle assessment of cane-sugar in Indonesian sugar mill: energy use and GHG emissions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 536(1), 12059.

- Gutiérrez, J. S., Gálvez, Y. F., Pérez, M. M., Pérez, C. B., Victoria, M. H., & Perera, A. N. (2016). Régimen de riego de explotación con la técnica por enrolladores, en el cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). *Agrisost*, 22(1), 9–23.
- Hackett, B. (2018). *The Essentials of Continuous Evaporation*. American Institute of Chemical Engineers.
- Hernández, L. (2023). *Comunicación personal*, 10 de noviembre.
- Herrera Álvarez, S., Gómez Rodríguez, L. A., & Cabrera Ferrán, P. (2020). INFLUENCIA DEL USO DEL CARBONATO DE CALCIO (CaCO_3) EN LA ALCALINIZACIÓN Y SEDIMENTACIÓN DEL JUGO DE CAÑA. *Centro Azúcar*, 47(3), 70–82.
- Herrera, I., de la Rúa, C., & Lechón, Y. (2015). Análisis del ciclo de vida del proceso de transformación de la caña de azúcar para la producción de bioetanol en la planta de Bella Unión de la empresa Alcoholes del Uruguay (ALUR). *Uruguay: Departamento de Energía CIEMAT*.
- Hiloidhari, M., Banerjee, R., & Rao, A. B. (2021). Life cycle assessment of sugar and electricity production under different sugarcane cultivation and cogeneration scenarios in India. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125170.
- Hugot, E. (1984). *Manual para ingenieros azucareros* (T. & DOC, Ed.; 1ere ed.).
- Ibrahim, K. (2011). *Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment methodologies: A state of the art*. Universitat de Lleida.
- ISO 14040. (2006). Análisis de ciclo de vida principios y marco de referencia. En *Icontec* (Número 571, pp. 1–24).
- Kaushal, A., Patole, R., & Singh, K. G. (2012). Drip irrigation in sugarcane: A review. *Agricultural Reviews*, 33(3), 211–219.
- Kent, G. A. (2011). The effect of added water temperature on milling train operation and performance. *Sugar tech*, 13(1), 1–6.
- Kltimor, R. (2022). *Stages of Sugarcane Production: A Review*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35454.10563>
- Klunder, R. (2023). *Comunicación personal*, 9 de noviembre.
- Laksameethanasana, P., Somla, N., Janprem, S., & Phochuen, N. (2012). Clarification of sugarcane juice for syrup production. *Procedia Engineering*, 32, 141–147.
- Landa, I. (2023). *Entrevista directa a encargado de laboratorio de molienda*.
- Lecler, N. L. (2017). Modified 'Twin-stacker' cane loading system. *Proceedings of the Annual Congress-South African Sugar Technologists' Association*, 90, 167–177.
- Lee, C. S., Chong, M. F., Robinson, J., & Binner, E. (2014). A review on development and application of plant-based bioflocculants and grafted bioflocculants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(48), 18357–18369.

- Li, Y.-R., & Yang, L.-T. (2015). Sugarcane agriculture and sugar industry in China. *Sugar Tech*, 17(1), 1–8.
- Lobo, P. C., Jaguaribe, E. F., Rodrigues, J., & Da Rocha, F. A. A. (2007). Economics of alternative sugar cane milling options. *Applied thermal engineering*, 27(8–9), 1405–1413.
- Lopez, B., Corporación, L., & Diego, S. (2017). *EVALUANDO LA OPERACIÓN DEL TÁNDEM DE MOLINOS DE UN INGENIO*.
- Malostro, J. (2023). *Comunicación personal*, 20 de noviembre.
- Marqués, A. O., Domínguez, S. P. P., Durán, J. I. T., & Gómez, A. R. (2017). Nivel de importancia del control interno de los inventarios dentro del marco conceptual de una empresa. *Liderazgo Estratégico*, 7(1), 71–82.
- Mathewos, T., Ramulu, P. J., & Esleman, E. A. (2019). Design Analysis and Modification of Sugarcane Fibriizer Hammer at Wonji Shoa Sugar Factory (WSSF) Ethiopia. En *Advances in Computational Methods in Manufacturing: Select Papers from ICCMM 2019* (pp. 933–946). Springer.
- Mendiola, M. (2022). *Comunicación personal*, 03 de diciembre.
- Mendoza Haro, E. I., & García Granizo, V. G. (2017). Optimización del proceso de preparación de caña incorporando una pre-picadora en compañía azucarera Valdez sa. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 21(82), 16–24.
- Meza-Palacios, R., Aguilar-Lasserre, A. A., Morales-Mendoza, L. F., Pérez-Gallardo, J. R., Rico-Contreras, J. O., & Avarado-Lassman, A. (2019). Life cycle assessment of cane sugar production: The environmental contribution to human health, climate change, ecosystem quality and resources in México. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 54(7), 668–678.
- Miranda, N. T., Motta, I. L., Maciel Filho, R., & Maciel, M. R. W. (2021). Sugarcane bagasse pyrolysis: A review of operating conditions and products properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111394.
- Moodley, S. (2010). *A REVIEW OF WHOLE-STICK SUGARCANE TRANSFER SYSTEMS*. University of KwaZulu-Natal Pietermaritzburg South Africa.
- Morales, C. (2022). *Entrevista directa en área de calentadores*.
- Mugica-Álvarez, V. (2016). *Determinación de factores de emisión de bióxido de carbono (CO₂), partículas en suspensión de 2.5 y 10 micras (PM_{2.5} y PM₁₀) y contaminantes de vida corta, metano (CH₄) y carbón negro por prácticas de quema agrícola*.
- Muñoz, E. (2022). *Comunicación personal*, 03 de diciembre.
- Muñoz, L. (2022). *Comunicación personal*, 03 de diciembre.
- Nalawade, S. M., Mehta, A. K., & Sharma, A. K. (2018). Sugarcane planting techniques: a review. *Contemporary research in India: National Seminar Recent Trends in Plant Sciences and Agricultural Research (PSAR-2018)*, 98–104.

- Oanh, N. T. K., Permadi, D. A., Hopke, P. K., Smith, K. R., Dong, N. P., & Dang, A. N. (2018a). Annual emissions of air toxics emitted from crop residue open burning in Southeast Asia over the period of 2010–2015. *Atmospheric Environment*, 187, 163–173.
- Oanh, N. T. K., Permadi, D. A., Hopke, P. K., Smith, K. R., Dong, N. P., & Dang, A. N. (2018b). Annual emissions of air toxics emitted from crop residue open burning in Southeast Asia over the period of 2010–2015. *Atmospheric Environment*, 187, 163–173.
- Ochoa George, P. A., Eras, J. J. C., Gutierrez, A. S., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2010). Residue from sugarcane juice filtration (filter cake): energy use at the sugar factory. *Waste and Biomass Valorization*, 1, 407–413.
- OECD. (2016). Sugarcane (*Saccharum spp.*)”, in Safety Assessment of Transgenic Organisms in the Environment. En *Safety Assessment of Transgenic Organisms in the Environment* (Volumen 6). OECD Publishing.
- Ogando, F. I. B., Xastre, T., Simões, E., & Aguiar, C. L. de. (2021). Removal of color and turbidity in sugarcane juice treated by electrocoagulation with aluminum electrodes. *Brazilian Journal of Food Technology*, 24.
- OGTR. (2011). *The Biology of the Saccharum spp. (Sugarcane)*. February, 36.
- OISSFAC. (2011). *Desarrollo de la metodología para la realización de análisis de ciclo de vida de automóviles y camiones* (p. 31). Fedit.
- Ortiz-Laurel, H. (2016). Efectividad y rentabilidad de técnicas de siembra de caña de azúcar (*Saccharum spp.*). *Agro Productividad*, 9(3).
- Panigrahi, C., Shaikh, A. E. Y., Bag, B. B., Mishra, H. N., & De, S. (2021). A technological review on processing of sugarcane juice: Spoilage, preservation, storage, and packaging aspects. *Journal of Food Process Engineering*, 44(6), e13706.
- Paredes, V. (2022). *Comunicación personal*, 03 de diciembre.
- Parvez, Y., & Hasan, M. M. (2019). Exergy analysis and performance optimization of bagasse fired boiler. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 691(1), 12089.
- Pavan, M. de C. O., Ramos, D. S., Soares, M. Y., & Carvalho, M. M. (2021). Circular business models for bioelectricity: A value perspective for sugar-energy sector in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 311, 127615.
- Pellegrini, L. F., & de Oliveira Jr, S. (2007). Exergy analysis of sugarcane bagasse gasification. *Energy*, 32(4), 314–327.
- Podany, P., Džugan, J., & Vacik, J. (2013). Construction of hammer for sugarcane shredder. *Advanced Materials Research*, 811, 308–313.
- Ramjeawon, T. (2004). Life cycle assessment of cane-sugar on the island of Mauritius. *The international journal of life cycle assessment*, 9, 254–260.

- Renouf, M. A., & Wegener, M. K. (2007). Environmental life cycle assessment (LCA) of sugarcane production and processing in Australia. *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists*, 29, 385–400.
- Reyes, J. (2023). *Comunicación personal*, 04 de abril.
- Rodríguez, R. (2023). *Comunicación personal*, 11 de abril.
- Roiz, J. (2010). *Les ACV appliquées aux produits biobasés* (p. 19). ValBiom.
- Romero, L. (2022). *Comunicación personal*, 10 de diciembre.
- SADER. (2022). *México cuenta con disponibilidad suficiente de azúcar para atender el abasto nacional y exportaciones*. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/mexico-cuenta-con-disponibilidad-suficiente-de-azucar-para-atender-el-abasto-nacional-y-exportaciones?idiom=es #:~:text=Reportes del sector estiman que,con el 6.21 por ciento>
- SADER. (2023). *Consumo per cápita de azúcar en México*. Mantiene México superávit comercial de azúcar de caña. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/mantiene-mexico-superavit-comercial-de-azucar-de-cana#:~:text=Expuso que el consumo per,entre ocho de 92 países>.
- SAGARPA. (2013). *Tecnología para el cultivo de la caña de azúcar en riego en el estado de San Luis Potosí 2013* (p. 7). Instituto Nacional de Investigadores Forestales, Agrícolas y Pecuarias (inifap).
- SAGARPA. (2017). *Caña de azúcar mexicana*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256427/B_sico-Ca_a_de_az_car.pdf
- SAGARPA. (2022). *Azúcar que endulza mi vida*. ¿Cuál es el origen de la caña de azucar y como llegó a nuestro continente? <http://siaprendes.siap.gob.mx/contenidos/3/03-cana-azucar/contexto-1.html>
- Sage, R. F., Peixoto, M. M., & Sage, T. L. (2013). Photosynthesis in Sugarcane. En *Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology* (Número December). <https://doi.org/10.1002/9781118771280.ch6>
- SAIC. (2006). *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*. EPA.
- Salgado, S., Núñez, R., J Peña, J., Etchevers, J. D., Palma, D. J., & Soto, R. M. (2003). Manejo de la fertilización en el rendimiento, calidad del jugo y actividad de invertasas en caña de azúcar. *Interciencia*, 28(10), 576–580.
- Sánchez Castro, Z., Gauthier-Maradei, P., & Escalante Hernández, H. (2013). Effect of particle size and humidity on sugarcane bagasse combustion in a fixed bed furnace. *Revista Ion*, 26(2), 73–85.
- Sánchez, S. C., Alejandro, I. A. G., De los Santos Ruiz, C., García, S. S., Ceja, R. C., Velázquez, S. S., Villegas, M. M. H., Espinoza, L. del C. L., Cárdenas, C. V., & Argüelles, R. G. S. (2019). EFFECT OF NUTRITIONAL RESERVES AND POSITION OF THE YEMAS IN THE STEM IN THE QUALITY OF SUGAR CANE PLANTS. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 22(3).

- Sasso, R. A., Koga, G. Y., Cruz, D. C., Figueira, G., & Gargarella, P. (2022). Failure analysis of oscillating hammer mill used in the sugarcane industry. *Engineering Failure Analysis*, 139, 106472.
- Sathiyamoorthy, M., Gebrekrstos, A., & Balachandran, G. (2013). A theoretical novel design approach to enhance the evaporator steam economy of large-scale sugar industries in Ethiopia. *J Eng Comput Appl Sci*, 2(12), 55–66.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). *Caña de azúcar, una dulce producción*. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/cana-de-azucar-una-dulce-produccion-237168#:~:text=La producci3n de caña en,a la producci3n de azúcar>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Sostenible. (2021). *Caña de azúcar un cultivo de importancia para México*. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cana-de-azucar-un-cultivo-de-importancia-para-mexico>
- Sieiro, G. L., Reyes, P. P., López, L. V., José, A., & Delgado, R. V. (2021). Estado nutricional de la caña de azúcar mediante el sistema de diagnóstico y recomendación integrado (Dris). *Agricultura Tropical*, 6(4).
- Singh, J., Singh, A. K., Sharma, M. P., Singh, P. R., & Srivastava, A. C. (2011). Mechanization of sugarcane cultivation in India. *Sugar Tech*, 13, 310–314.
- Singh, S., Tripathi, A., & Singh, A. K. (2017). Effect of Furrow opener design, furrow depth, operating speed on soil characteristics, draft and germination of sugarcane. *Sugar Tech*, 19, 476–484.
- Skone, T. (2000). Whats is Life Cycle Interpretation? *Environmental Progress*, 19(2), 92–100.
- Smith, R., & Mobley, R. K. (2003). *Industrial machinery repair: best maintenance practices pocket guide*. Butterworth-Heinemann.
- Sosa-Arnan, J. H., Corrêa, J. L. G., Silva, M. A., & Nebra, S. A. (2006). Sugar cane bagasse drying- a review. *International sugar journal*, 108(1291), 381.
- Sosa-Arnan, J. H., & Nebra, S. A. (2009). Bagasse dryer role in the energy recovery of water tube boilers. *Drying Technology*, 27(4), 587–594.
- Soto, M.-A. (2023). *Entrevista directa en supervisor ambiental*.
- Stranddorf, H., Hoffmann, L., & Schmidt, A. (2005). *Impact categories, normalisation and weighting in LCA* (78; Environmental News).
- Thai, C. C. D., Bakir, H., & Doherty, W. O. S. (2012). Insights to the clarification of sugar cane juice expressed from sugar cane stalk and trash. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(11), 2916–2923.
- Thylmann, D. (2017). *Water footprint - methodology overview*.
- Tibaquirá, J. E., Carmona, J. S., Piarpuzán, D. F., & Restrepo, Á. (2022). Steam economy in the sugar manufacturing process of the Risaralda Sugar Mill. *CHEMICAL ENGINEERING*, 24(1–2022).

- Usaborisut, P. (2018). Progress in mechanization of sugarcane farms in Thailand. *Sugar tech*, 20(2), 116–121.
- Vargas, P. (2023). *Comunicación personal, 05 de diciembre*.
- Vasquez, E. (2023). *Comunicación personal, 10 de abril*.
- Vega, R. (2016). Limpieza de caña en seco como alternativa para la reducción de consumo de agua y pérdidas de azúcar en ingenios guatemaltecos. *Memoria de Presentación de Resultados de Investigación zafra, 2017*, 395–412.
- Vélez, C. (2010). Limpieza de caña en seco y aprovechamiento de la materia extraña vegetal como combustible en Brasil. *Revista Técnicaña*, 26, 12–19.
- Verma, P., Shah, N., & Mahajani, S. (2019). Effect of sodium hydrosulphite treatment on the quality of non-centrifugal sugar: Jaggery. *Food chemistry*, 299, 125043.
- Zhang, C., Wang, H., Bai, L., Wu, C., Shen, L., Sippula, O., Yang, J., Zhou, L., He, C., & Liu, J. (2020). Should industrial bagasse-fired boilers be phased out in China? *Journal of Cleaner Production*, 265, 121716.
- Zhang, J., Li, G., & Borrion, A. (2021). Life cycle assessment of electricity generation from sugarcane bagasse hydrochar produced by microwave assisted hydrothermal carbonization. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125980.

ANEXO A

Lista de chequeo - Etapa agrícola					
Proyecto de Análisis de Ciclo de Vida del azúcar					
Universidad Veracruzana - Ingenio de Mahuixtlán, Veracruz					
Entrevistador:					
Entrevistado:					
Fecha:					
Hora:					
Lugar:					
	Si	No	Cantidad	Unidad	Observaciones
¿Cuántas hectáreas siembra?					
¿Qué tipo de ciclo es?					
<i>Nueva plantación</i>					
Lugar de adquisición de las plantas					
Tipo de vehículo de transporte					
No. De viajes realizados					
Cda. Aprox de combustible cons.					
<i>Resoca o resiembra</i>					
¿Realiza subsolado?					
<i>Manual</i>					
Yunta					
Flotilla					
<i>Mecanizado</i>					
¿Cuántas máquinas?					
¿Cuánto tiempo?					
¿Cuántas veces?					
¿Cuánto consume de comb.?					
¿Realiza barbecho?					
<i>Manual</i>					
Yunta					
Flotilla					
<i>Mecanizado</i>					
¿Cuántas máquinas?					
¿Cuánto tiempo?					
¿Cuántas veces?					
¿Cuánto consume de comb.?					
¿Realiza rastreo?					
<i>Manual</i>					
Yunta					

Flotilla					
<i>Mecanizado</i>					
¿Cuántas máquinas?					
¿Cuánto tiempo?					
¿Cuántas veces?					
¿Cuánto consume de comb.?					
¿Realiza surcado?					
<i>Manual</i>					
Yunta					
Flotilla					
<i>Mecanizado</i>					
¿Cuántas máquinas?					
¿Cuánto tiempo?					
¿Cuántas veces?					
¿Cuánto consume de comb.?					
Siembra					
<i>Manual</i>					
¿Cuántas personas participan?					
¿Durante cuánto tiempo?					
Implementos que usan					
Machete					
Palín					
¿Realiza fertilización?					
<i>Automático</i>					
Tractor					
Implemento					
Consumo de combustible					
Tiempo de operación					
Sustitución de llantas					
Otros insumos de mantenimiento					
<i>Manual</i>					

Número de personas					
Herramientas de las personas					
Tiempo dedicado a la fertilización					
¿Cuántas aspersoras?					
¿Cuánta agua?					
¿De donde proviene el agua?					
Tipo de transporte					
Distancia de transporte					
Consumo de combustible del transp.					
¿Aplican cachaza u otro fertilizante orgánico?					
¿Cuánta cachaza agregan por area?					
¿Han notado algún cambio en productividad al agregar cachaza?					
¿Cuántas camionadas solicitan?					
¿Realiza riego?					
<i>Automático</i>					
Sistema eléctrico					
Gravedad					
Origen del agua					
Cantidad de agua regada					
<i>Manual</i>					
Transporte de agua					
Vehículo utilizado					
Fuente del agua					
Cantidad de agua transportada					
¿Realiza control de malezas?					
<i>Automático</i>					
Tractor					
Implemento					
Consumo de combustible					
Tiempo de operación					
Sustitución de llantas					

Otros insumos de mantenimiento					
<i>Manual</i>					
Número de personas					
Herramientas de las personas					
Tiempo dedicado a la fertilización					
Tipo de producto agroquímico					
Frecuencia de aplicación					
Aplicación en seco					
Aplicación en húmedo					
¿Cuánta agua?					
¿Cuántos aspersores?					
¿Tiempo de aplicación?					
¿Origen del agua?					
¿Realiza segunda fertilización?					
<i>Automático</i>					
Tractor					
Implemento					
Consumo de combustible					
Tiempo de operación					
Sustitución de llantas					
Otros insumos de mantenimiento					
<i>Manual</i>					
Número de personas					
Herramientas de las personas					
Tiempo dedicado a la fertilización					
¿Cuántas aspersoras?					
¿Cuánta agua?					
¿De donde proviene el agua?					
Tipo de transporte					
Distancia de transporte					

Consumo de combustible del transp.					
¿Realiza segundo control de malezas?					
<i>Automático</i>					
Tractor					
Implemento					
Consumo de combustible					
Tiempo de operación					
Sustitución de llantas					
Otros insumos de mantenimiento					
<i>Manual</i>					
Número de personas					
Herramientas de las personas					
Tiempo dedicado a la fertilización					
¿Cuántas aspersoras?					
¿Cuánta agua?					
¿De donde proviene el agua?					
Tipo de transporte					
Distancia de transporte					
Consumo de combustible del transp.					
¿Realiza quema?					
¿Cuántos litros de gasolina/diésel?					
¿Cuántos cerillos?					
Corte de caña					
No. de personas en corte					
Herramienta de corte					
Tiempo aprox. de corte					
Levante de caña					
<i>Manual</i>					
Número de personas					
Herramientas de levante					
<i>Automático</i>					
Maquinaria					

Tiempo de operación					
Cantidad de combustible					
Sustitución de llantas					
Otros insumos de mantenimiento					
Producción de semilla					
Tratamiento de semilla					
Agua caliente					
Aire caliente					
Productos químicos utilizados					
Cantidad de agua requerida					
Transporte para almacen					
Distancia recorrida					
Tipo de vehículo					
Combustible aproximado					
No. De viajes realizados					

ANEXO B

En los siguientes párrafos se muestran los inventarios completos de cada etapa y equipo dentro de la etapa industrial.

Tabla 81. Resultados completos del ICV de la grúa autosustentable					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Entrada de caña desde campo	1.0469E-03	ton	72	51	E
Cantidad de caña trasladada por grúa	3.9175E-04	ton	73	55	E
Cantidad de caña saliente	3.9175E-04	ton	74	56	S
Energía eléctrica	5.4587E-04	kVWh	75	57	E
Electrodo 1360 de 5/32"	2.9309E-08	kg	76	58	E
Transporte de electrodo 1360 de 5/32"	1.7069E-04	kgkm	77	64	E
Emisión de Cr por electrodo 1360 de 5/32"	1.0405E-08	g Cr	78	70	S
Emisión de Mn por electrodo 1360 de 5/32"	1.2603E-09	g Mn	79	72	S
Emisión de Ni por electrodo 1360 de 5/32"	4.5722E-09	g Ni	80	73	S
Electrodo 1370 de 1/8"	1.9539E-09	kg	81	58	E
Transporte de electrodo 1370 de 1/8"	6.9169E-07	kgkm	82	64	E
Emisión de Cr por electrodo 1370 de 1/8"	1.0649E-09	g Cr	83	70	S
Emisión de Ni por electrodo 1370 de 1/8"	8.3042E-10	g Ni	84	73	S
Electrodo 508 de 1/8"	3.9078E-09	kg	85	58	E
Transporte de electrodo 508 de 1/8"	9.2225E-07	kgkm	86	64	E
Emisión de Cr por electrodo 508 de 1/8"	1.3873E-09	g Cr	87	70	S
Emisión de Mn por electrodo 508 de 1/8"	1.6804E-10	g Mn	88	72	S
Emisión de Ni por electrodo 508 de 1/8"	6.0962E-10	g Ni	89	73	S
Electrodo 508 de 3/32"	5.4710E-09	kg	90	58	E
Transporte de electrodo 508 de 3/32"	1.9367E-06	kgkm	91	64	E
Emisión de Cr por electrodo 508 de 3/32"	1.9422E-09	g Cr	92	70	S
Emisión de Mn por electrodo 508 de 3/32"	2.3525E-10	g Mn	93	72	S
Emisión Ni Cr por electrodo 508 de 3/32"	8.5347E-10	g Ni	94	70	S
Electrodo 6010 de 1/8"	9.9650E-08	kg	95	58	E
Transporte de electrodo 6010 de 1/8"	5.3891E-04	kgkm	96	64	E
Emisión de Cr por electrodo 6010 de 1/8"	3.9860E-10	g Cr	97	73	S
Emisión de Co por electrodo 6010 de 1/8"	9.9650E-11	g Co	98	71	S
Emisión de Mn por electrodo 6010 de 1/8"	8.8190E-08	g Mn	99	72	S
Emisión de Ni por electrodo 6010 de 1/8"	5.9790E-10	g Ni	100	70	S
Electrodo 6010 de 5/32"	5.9595E-08	kg	101	58	E
Transporte de electrodo 6010 de 5/32"	2.7271E-04	kgkm	102	64	E
Emisión de Cr por electrodo 6010 de 5/32"	2.3838E-10	g Cr	103	70	S
Emisión de Co por electrodo 6010 de 5/32"	5.9595E-11	g Co	104	71	S
Emisión de Mn por electrodo 6010 de 5/32"	5.2741E-08	g Mn	105	72	S

Tabla 8I. Resultados completos del ICV de la grúa autosustentable					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Emisión de Ni por electrodo 6010 de 5/32"	3.5757E-10	g Ni	106	70	S
Electrodo 6013 de 1/8"	1.4068E-08	kg	107	58	E
Transporte de electrodo 6013 de 1/8"	5.8524E-06	kgkm	108	64	E
Emisión de Cr por electrodo 6013 de 1/8"	3.3764E-10	g Cr	109	70	S
Emisión de Mn por electrodo 6013 de 1/8"	1.4490E-08	g Mn	110	72	S
Electrodo 6013 de 3/32"	1.1724E-08	kg	111	58	E
Transporte de electrodo 6013 de 3/32"	4.8770E-06	kgkm	112	64	E
Emisión de Cr por electrodo 6013 de 3/32"	2.8137E-10	g Cr	113	70	S
Emisión de Mn por electrodo 6013 de 3/32"	1.2075E-08	g Mn	114	72	S
Electrodo 7018 de 1/8"	1.6315E-07	kg	115	58	E
Transporte de electrodo 7018 de 1/8"	1.6968E-03	kgkm	116	64	E
Emisión de Cr por electrodo 7018 de 1/8"	1.6315E-09	g Cr	117	70	S
Emisión de Mn por electrodo 7018 de 1/8"	1.5695E-07	g Mn	118	72	S
Electrodo 7018 de 3/32"	1.1724E-08	kg	119	58	E
Transporte de electrodo 7018 de 3/32"	1.4631E-05	kgkm	120	64	E
Emisión de Cr por electrodo 7018 de 3/32"	1.1724E-10	g Cr	121	70	S
Emisión de Mn por electrodo 7018 de 3/32"	1.1278E-08	g Mn	122	72	S
Electrodo 7018 de 5/32"	1.3677E-08	kg	123	58	E
Transporte de electrodo 7018 de 5/32"	2.2759E-05	kgkm	124	64	E
Emisión de Cr por electrodo 7018 de 5/32"	1.3677E-10	g Cr	125	70	S
Emisión de Mn por electrodo 7018 de 5/32"	1.3158E-08	g Mn	126	72	S
Electrodo 240 de 1/8"	1.0747E-08	kg	127	58	E
Emisión de Cr por electrodo 240 de 1/8"	5.8569E-09	g Cr	128	70	S
Emisión de Ni por electrodo 240 de 1/8"	4.5673E-10	g Ni	129	73	S
Electrodo 7007 de 1/8"	1.7585E-08	kg	130	58	E
Transporte de electrodo 7007 de 1/8"	2.3142E-05	kgkm	131	64	E
Emisión de Cr por electrodo 7007 de 1/8"	9.5840E-09	g Cr	132	70	S
Emisión de Ni por electrodo 7007 de 1/8"	7.4738E-10	g Ni	133	73	S
Cable de acero de 1/2"	2.7574E-08	kg	134	59	E
Transporte de cable de acero 1/2"	1.8419E-05	kgkm	135	65	E
Gas LP	1.4181E-07	kg	136	61	E
Transporte de gas LP	9.6146E-05	kgkm	137	67	E
Oxígeno	1.3528E-06	kg	138	62	E
Transporte de oxígeno	2.0260E-02	kgkm	139	68	E
Paños azules	2.5499E-10	kg	140	63	E
Transporte de paños azules	4.1512E-07	kgkm	141	69	E
Paños azules	2.5499E-10	kg	142	74	S
Caña hacia mesa I	3.9175E-04	ton	143	56	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 82. Resultados del ICV completo para el volcador de hilos					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Entrada de caña	6.5505E-04	ton	144	75	E
Energía eléctrica	4.2988E-04	kVWh	145	77	E
Aceite hidráulico	1.4128E-06	kg	146	78	E
Transporte de aceite hidráulico	3.5037E-04	kgkm	147	84	E
Emisión de aceite hidráulico	1.4128E-06	kg	148	94	S
Cable de acero	5.7305E-07	kg	149	79	E
Transporte de cable de acero	7.6559E-04	kgkm	150	85	E
Cable manila de 3/4"	8.2163E-09	kg	151	80	E
Transporte de cable manila de 3/4"	2.7442E-06	kgkm	152	86	E
Cable manila de 3/8"	2.6124E-09	kg	153	80	E
Transporte de cable manila de 3/8"	3.4902E-06	kgkm	154	86	E
Electrodo 240 de 1/8"	3.9078E-09	kg	155	81	E
Emisión de Cr por electrodo 240 de 1/8"	2.1298E-09	g Cr	156	90	S
Emisión de Ni por electrodo 240 de 1/8"	1.6608E-10	g Ni	157	93	S
Oxígeno	5.3051E-08	kg	158	82	E
Transporte de oxígeno	7.9449E-04	kgkm	159	88	E
Paños azules	3.1165E-10	kg	160	83	E
Transporte de paños azules	5.0737E-07	kgkm	161	89	E
Salida de caña	6.5505E-04	ton	162	76	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 83. Resultados del ICV completo para la mesa alimentadora uno					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Entrada de caña a mesa I	3.9175E-04	ton	163	94	E
Energía eléctrica	4.0941E-04	kVWh	164	97	E
Agua	1.9646E-03	m ³	165	98	E
Agua residual	1.9646E-03	m ³	166	99	S
DBO (agua residual)	3.2723E-07	ton	167	100	S
Nitrógeno (agua residual)	2.0257E-08	ton	168	101	S
Fósforo (agua residual)	4.9274E-09	ton	169	102	S
Arsénico (agua residual)	1.9646E-12	ton	170	103	S
Cadmio (agua residual)	1.9646E-11	ton	171	104	S
Cianuro (agua residual)	2.7425E-11	ton	172	105	S
Cobre (agua residual)	2.4558E-10	ton	173	106	S
Cromo (agua residual)	2.3379E-10	ton	174	107	S
Mercurio (agua residual)	9.8231E-13	ton	175	108	S
Níquel (agua residual)	2.4754E-10	ton	176	109	S
Plomo (agua residual)	1.9749E-10	ton	177	110	S

Tabla 83. Resultados del ICV completo para la mesa alimentadora uno					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Zinc (agua residual)	1.5324E-10	ton	178	111	S
DQO (agua residual)	5.3125E-07	ton	179	112	S
Salida de caña hacia conductor 1	3.7095E-04	ton	180	113	S
Pérdida de caña en mesa 1	2.0801E-05	ton	181	114	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 84. Resultados del ICV completo para la mesa alimentadora dos					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Caña de entrada desde volcador de hilos	6.5505E-04	kWh	182	113	E
Energía eléctrica	6.1411E-04	kWh	183	116	S
Agua	1.9646E-03	m ³	184	123	E
Agua residual	1.9646E-03	m ³	185	124	S
DBO (agua residual)	3.2723E-07	ton	186	125	S
Nitrógeno (agua residual)	2.0257E-08	ton	187	126	S
Fósforo (agua residual)	4.9274E-09	ton	188	127	S
Arsénico (agua residual)	1.9646E-12	ton	189	128	S
Cadmio (agua residual)	1.9646E-11	ton	190	129	S
Cianuro (agua residual)	2.7425E-11	ton	191	130	S
Cobre (agua residual)	2.4558E-10	ton	192	131	S
Cromo (agua residual)	2.3379E-10	ton	193	132	S
Mercurio (agua residual)	9.8231E-13	ton	194	133	S
Níquel (agua residual)	2.4754E-10	ton	195	134	S
Plomo (agua residual)	1.9749E-10	ton	196	135	S
Zinc (agua residual)	1.5324E-10	ton	197	136	S
DQO (agua residual)	5.3125E-07	ton	198	137	S
Aceite mobilgear 600 220	1.0481E-08	kg	199	117	E
Transporte de aceite mobilgear 600 220	3.8989E-06	kgkm	200	120	E
Aceite mobilgear 600 460	1.0598E-08	kg	201	118	E
Transporte de aceite mobilgear 600 460	3.9425E-06	kgkm	202	121	E
Paños azules marca	1.9832E-10	kg	203	119	E
Transporte de paños azules	3.2287E-07	kgkm	204	122	E
Salida de caña hacia conductor 1	6.3424E-04	ton	205	115	S
Pérdida de caña en mesa 2	2.0801E-05	ton	206	114	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 85. Resultados del ICV completo para el conductor de caña uno					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Caña proveniente de mesa 1	3.7095E-04	ton	207	138	E
Caña proveniente de mesa 2	6.3424E-04	ton	208	138	E

Tabla 85. Resultados del ICV completo para el conductor de caña uno					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Energía eléctrica	8.5293E-04	kWh	209	140	E
Caña saliente de conductor de caña I	1.0052E-03	ton	210	139	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 86. Resultados del ICV completo para el juego de cuchillas uno					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Caña de entrada proveniente de "conductor I"	1.0052E-03	ton	211	141	E
Energía eléctrica	1.3647E-05	kWh	212	143	E
Agua para enfriamiento	2.3407E-05	m ³	213	145	E
Agua de enfriamiento de salida	2.3407E-05	m ³	214	158	S
Aceite mobilgear 600 220	1.0481E-07	kg	215	147	E
Transporte de aceite 600 220	3.8989E-05	kgkm	216	151	E
Electrodo 1360 de 5/32"	9.7696E-09	kg	217	146	E
Transporte de electrodo 1360 de 5/32"	5.6898E-05	kgkm	218	150	E
Emisión de Cr por electrodo 1360 de 5/32"	3.4682E-09	g Cr	219	155	S
Emisión de Mn por electrodo 1360 de 5/32"	4.2009E-10	g Mn	220	156	S
Emisión de Ni por electrodo 1360 de 5/32"	1.5241E-09	g Ni	221	157	S
Electrodo 7018 de 1/8"	3.9078E-09	kg	222	146	E
Transporte de electrodo 7018 de 1/8"	4.0642E-05	kgkm	223	150	E
Emisión de Cr por electrodo 7018 de 1/8"	3.9078E-11	g Cr	224	155	S
Emisión de Mn por electrodo 7018 de 1/8"	3.7594E-09	g Mn	225	156	S
Electrodo 7018 de 5/32"	1.9539E-09	kg	226	146	E
Transporte de electrodo 7018 de 5/32"	3.2513E-06	kgkm	227	150	E
Emisión de Cr por electrodo 7018 de 5/32"	1.9539E-11	g Cr	228	155	S
Emisión de Mn por electrodo 7018 de 5/32"	1.8797E-09	g Mn	229	156	S
Oxígeno	2.3873E-07	kg	230	148	E
Transporte de oxígeno	3.5752E-03	kgkm	231	152	E
Paños azules	2.8332E-10	kg	232	149	E
Transporte de paños azules	4.6124E-07	kgkm	233	153	E
Caña de salida en juego de cuchillas I	1.0052E-03	ton	234	142	S
Vapor para turbina de juego de cuchilla I	8.1225E-02	MJ	235	144	E
Vapor de escape de turbina de juego de cuchilla I	7.0338E-02	MJ	236	157	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 87. Resultados del ICV completo para el conductor de caña dos					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Caña proveniente de "Juego de cuchillas I"	1.0052E-03	ton	237	159	E
Energía eléctrica	1.3647E-05	kWh	238	161	E
Caña saliente de "Conductor de caña 2"	8.8666E-04	ton	239	160	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 88. Resultados del ICV completo para el juego de cuchillas dos					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Caña de entrada de "conductor de caña 2"	8.8666E-04	ton	240	162	E
Energía eléctrica	1.3647E-05	kWh	241	164	E
Agua para enfriamiento	2.3407E-05	m ³	242	166	E
Agua residual	2.3407E-05	m ³	243	173	S
Electrodo 1360 de 5/32"	1.3677E-08	kg	244	167	E
Transporte de electrodo 1360 de 5/32"	7.9658E-05	kgkm	245	168	E
Emisión de Cr por electrodo 1360 de 5/32"	4.8555E-09	g Cr	246	170	S
Emisión de Mn por electrodo 1360 de 5/32"	5.8813E-10	g Mn	247	171	S
Emisión de Ni por electrodo 1360 de 5/32"	2.1337E-09	g Ni	248	172	S
Vapor de entrada a juego de cuchillas 2	8.1225E-02	MJ	249	165	E
Caña de salida de juego de cuchillas 2	1.0052E-03	ton	250	163	S
Vapor de escape de juego de cuchillas 2	7.0338E-02	MJ	251	169	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 89. Resultados del ICV completo para la desfibradora					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Caña de entrada de "juego de cuchillas 2"	1.0052E-03	ton	252	174	E
Energía eléctrica	2.7294E-05	kWh	253	176	E
Aceite turbinas 15	2.2887E-07	kg	254	179	E
Transporte de aceite turbinas 15	1.1352E-04	kgkm	255	183	E
Electrodo 1360 de 5/32"	5.8618E-09	kg	256	178	E
Transporte de electrodo 1360 de 5/32"	3.4139E-05	kgkm	257	182	E
Emisión de Cr por electrodo 1360 de 5/32"	2.0809E-09	g Cr	258	187	S
Emisión de Mn por electrodo 1360 de 5/32"	2.5206E-10	g Mn	259	189	S
Emisión de Ni por electrodo 1360 de 5/32"	9.1444E-10	g Ni	260	190	S
Electrodo 6010 de 1/8"	9.7696E-10	kg	261	178	E
Transporte de electrodo 6010 de 1/8"	5.2834E-06	kgkm	262	182	E
Emisión de Cr por electrodo 6010 de 1/8"	3.9078E-12	g Cr	263	187	S
Emisión de Co por electrodo 6010 de 1/8"	9.7696E-13	g Co	264	188	S
Emisión de Mn por electrodo 6010 de 1/8"	8.6461E-10	g Mn	265	189	S
Emisión de Ni por electrodo 6010 de 1/8"	5.8618E-12	g Ni	266	190	S
Electrodo 7018 de 1/8"	1.3677E-08	kg	267	178	E
Transporte de electrodo 7018 de 1/8"	1.4225E-04	kgkm	268	182	E
Emisión de Cr por electrodo 7018 de 1/8"	1.3677E-10	g Cr	269	187	S
Emisión de Mn por electrodo 7018 de 1/8"	1.3158E-08	g Mn	270	189	S
Electrodo 7018 de 3/32"	1.9539E-09	kg	271	178	E
Transporte de electrodo 7018 de 3/32"	2.4385E-06	kgkm	272	182	E

Tabla 89. Resultados del ICV completo para la desfibradora

Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Emisión de Cr por electrodo 7018 de 3/32"	1.9539E-11	g Cr	273	187	S
Emisión de Mn por electrodo 7018 de 3/32"	1.8797E-09	g Mn	274	189	S
Gas LP	6.0880E-08	kg	275	180	E
Transporte de gas LP	4.1277E-05	kgkm	276	184	E
Paños azules	1.1333E-10	kg	277	181	E
Transporte de paños azules	1.8450E-07	kgkm	278	185	E
Vapor de entrada a la desfibradora	1.6422E-01	MJ	279	177	E
Vapor de salida de la desfibradora	1.4221E-01	MJ	280	186	S
Caña saliente hacia molienda	1.0049E-03	ton	281	175	S
Caña perdida desfibrada	2.4107E-07	ton	282	191	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 90. Resultados del ICV completo para los servicios generales

Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Aceite mobilgear 600 220	7.3366E-08	kg	283	193	E
Transporte de aceite 600 220	2.7292E-05	kgkm	284	203	E
Aceite mobilgear 600 460	7.4187E-08	kg	285	193	E
Transporte de aceite 600 460	2.7597E-05	kgkm	286	203	E
Aceite hidráulico MH-300	2.3587E-06	kg	287	193	E
Transporte de aceite hidráulico MH-300	5.8495E-04	kg	288	203	E
Calidra saco 25 kg	3.9078E-07	kg	289	194	E
Transporte de Calidra saco 25 kg	1.4850E-05	kgkm	290	204	E
Cemento gris	8.4996E-06	kg	291	195	E
Transporte de cemento gris	5.1677E-04	kgkm	292	205	E
Electrodo 1360 de 5/32"	2.0712E-07	kg	293	194	E
Transporte de electrodo 1360 de 5/32"	1.2062E-03	kgkm	294	202	E
Emisión de Cr por electrodo 1360 de 5/32"	6.0694E-09	g Cr	295	212	S
Emisión de Mn por electrodo 1360 de 5/32"	7.3516E-10	g Mn	296	214	S
Emisión de Ni por electrodo 1360 de 5/32"	2.6671E-09	g Ni	297	215	S
Electrodo 1370 de 1/8"	5.4710E-08	kg	298	194	E
Transporte de electrodo 1370 de 1/8"	1.9367E-05	kgkm	299	202	E
Emisión de Cr por electrodo 1370 de 1/8"	1.3950E-07	g Cr	300	212	S
Emisión de Ni por electrodo 1370 de 1/8"	1.0878E-07	g Ni	301	215	S
Electrodo 508 de 1/8"	1.6608E-08	kg	302	194	E
Transporte de electrodo 508 de 1/8"	3.9196E-06	kgkm	303	202	E
Emisión de Cr por electrodo 508 de 1/8"	7.6301E-09	g Cr	304	212	S
Emisión de Mn por electrodo 508 de 1/8"	9.2421E-10	g Mn	305	214	S
Emisión de Ni por electrodo 508 de 1/8"	3.3529E-09	g Ni	306	215	S
Electrodo 508 de 3/32"	1.7097E-08	kg	307	194	E

Tabla 90. Resultados del ICV completo para los servicios generales					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Transporte de electrodo 508 de 3/32"	6.0523E-06	kgkm	308	202	E
Emisión de Cr por electrodo 508 de 3/32"	1.0405E-08	g Cr	309	212	S
Emisión de Mn por electrodo 508 de 3/32"	1.2603E-09	g Mn	310	214	S
Emisión de Ni por electrodo 508 de 3/32"	4.5722E-09	g Ni	311	215	S
Electrodo 6010 de 1/8"	2.5596E-07	kg	312	194	E
Transporte de electrodo 6010 de 1/8"	1.5972E-03	kgkm	313	202	E
Emisión de Cr por electrodo 6010 de 1/8"	6.6433E-11	g Cr	314	212	S
Emisión de Co por electrodo 6010 de 1/8"	1.6608E-11	g Co	315	213	S
Emisión de Mn por electrodo 6010 de 1/8"	1.4698E-08	g Mn	316	214	S
Emisión de Ni por electrodo 6010 de 1/8"	9.9650E-11	g Ni	317	215	S
Electrodo 6010 de 5/32"	2.1493E-08	kg	318	194	E
Transporte de electrodo 6010 de 5/32"	9.8353E-05	kgkm	319	202	E
Emisión de Cr por electrodo 6010 de 5/32"	2.2197E-09	g Cr	320	212	S
Emisión de Co por electrodo 6010 de 5/32"	5.5491E-10	g Co	321	213	S
Emisión de Mn por electrodo 6010 de 5/32"	4.9110E-07	g Mn	322	214	S
Emisión de Ni por electrodo 6010 de 5/32"	3.3295E-09	g Ni	323	215	S
Electrodo 6013 de 1/8"	2.9309E-08	kg	324	194	E
Transporte de electrodo 6013 de 1/8"	1.2192E-05	kgkm	325	202	E
Emisión de Cr por electrodo 6013 de 1/8"	6.7997E-10	g Cr	326	212	S
Emisión de Mn por electrodo 6013 de 1/8"	2.9182E-08	g Mn	327	214	S
Electrodo 6013 de 3/32"	1.6608E-08	kg	328	194	E
Transporte de electrodo 6013 de 3/32"	6.9091E-06	kgkm	329	202	E
Emisión de Cr por electrodo 6013 de 3/32"	1.9227E-09	g Cr	330	212	S
Emisión de Mn por electrodo 6013 de 3/32"	8.2514E-08	g Mn	331	214	S
Electrodo 7018 de 1/8"	5.5491E-07	kg	332	194	E
Transporte de electrodo 7018 de 1/8"	5.7711E-03	kgkm	333	202	E
Emisión de Cr por electrodo 7018 de 1/8"	1.4654E-10	g Cr	334	212	S
Emisión de Mn por electrodo 7018 de 1/8"	1.4098E-08	g Mn	335	214	S
Electrodo 7018 de 3/32"	2.8332E-08	kg	336	194	E
Transporte de electrodo 7018 de 3/32"	3.5358E-05	kgkm	337	202	E
Emisión de Cr por electrodo 7018 de 3/32"	4.4940E-11	g Cr	338	212	S
Emisión de Mn por electrodo 7018 de 3/32"	4.3233E-09	g Mn	339	214	S
Electrodo 7018 de 5/32"	8.0111E-08	kg	340	194	E
Transporte de electrodo 7018 de 5/32"	1.3330E-04	kgkm	341	202	E
Emisión de Cr por electrodo 7018 de 5/32"	6.5456E-10	g Cr	342	212	S
Emisión de Mn por electrodo 7018 de 5/32"	6.2969E-08	g Mn	343	214	S
Electrodo eutectrode 240 de 1/8"	4.4940E-09	kg	344	194	E
Emisión de Cr por electrodo 240 de 1/8"	1.3098E-07	g Cr	345	212	S
Emisión de Ni por electrodo 240 de 1/8"	1.0214E-08	g Ni	346	215	S

Tabla 90. Resultados del ICV completo para los servicios generales					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Electrodo me 7007 de 1/8"	6.5456E-08	kg	347	194	E
Transporte de electrodo me 7007 de 1/8"	8.6141E-05	kgkm	348	202	E
Emisión de Cr por electrodo me 7007 de 1/8"	1.8902E-05	g Cr	349	212	S
Emisión de Ni por electrodo me 7007 de 1/8"	1.4740E-06	g Ni	350	215	S
Gas LP	8.0411E-07	kg	351	196	E
Transporte de gas LP	5.4518E-04	kgkm	352	206	E
Grasa XHP 222	2.1149E-07	kg	353	197	E
Transporte de grasa XHP 222	5.2450E-05	kgkm	354	207	E
Oxido de calcio	3.4682E-05	kg	355	201	E
Transporte de óxido de calcio	5.3064E-02	kgkm	356	211	E
Oxígeno	5.9710E-06	kg	357	198	E
Transporte de oxígeno	8.9422E-02	kgkm	358	208	E
Paños azules	1.6061E-08	kg	359	200	E
Transporte de paños azules	2.6147E-05	kgkm	360	210	E
Cadena de ingeniería	1.0003E-06	kg	361	199	E
Transporte de cadena de ingeniería	1.1803E-04	kgkm	362	209	E

Fuente: elaboración propia

Tabla 91. Resultados del ICV completo para el molino uno					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Entrada de caña desfibrada	1.0050E-03	ton	363	216	E
Energía eléctrica de donelly I	3.2604E-04	kWh	364	219	E
Agua de refrigeración de molino I	3.5519E-05	ton	365	220	E
Vapor consumido por molino I	8.1399E-02	MJ	366	221	E
Vapor de salida de molino I	7.0338E-02	MJ	367	231	S
Agua de enfriamiento recuperada	3.4421E-05	ton	368	236	S
Fuga de agua de refrigeración de molino I	1.0972E-06	ton	369	230	S
Jugo claro molino I	6.0405E-04	ton	370	217	S
Tornillo	8.9320E-11	ton	371	223	E
Transporte de tornillo	9.3586E-06	tonkm	372	227	E
Electrodo 6010 de 1/8"	1.3677E-08	kg	373	222	E
Transporte de electrodo 6010 de 1/8"	7.3968E-05	kgkm	374	226	E
Emisión de Cr	5.4710E-11	g	375	232	S
Emisión de Co	1.3677E-11	g	376	233	S
Emisión de Mn	1.2105E-08	g	377	234	S
Emisión de Ni	8.2065E-11	g	378	235	S
Electrodo 7018 de 5/32"	1.5631E-08	kg	379	222	E
Transporte de 7018 de 5/32"	2.6011E-05	kgkm	380	226	E
Emisión de Cr	1.5631E-10	g	381	232	S

Tabla 91. Resultados del ICV completo para el molino uno

Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Emisión de Mn	1.5037E-08	g	382	234	S
Electrodo 27 de 1/8"	3.9078E-09	kg	383	222	E
Transporte de 27 de 1/8"	6.5027E-06	kgkm	384	227	E
Emisión de Cr	2.1298E-09	g	385	232	S
Emisión de Ni	1.6608E-10	g	386	235	S
Oxígeno	2.6526E-11	ton	387	225	E
Transporte de oxígeno	3.9725E-07	tonkm	388	229	E
Gas LP	5.9087E-11	ton	389	224	E
Transporte de gas LP	2.1633E-08	tonkm	390	228	E
Bagazo húmedo molino 1	3.2023E-04	ton	391	218	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 92. Resultados del ICV completo para el molino dos

Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Agua de imbibición (jugo) molino 3	3.2023E-04	ton	392	237	E
Energía eléctrica de donelly 2	2.1310E-04	kWh	393	239	E
Energía eléctrica donelly 3	3.2815E-04	kWh	394	239	E
Energía eléctrica de motor bomba de maceración 1	1.9968E-04	kWh	395	239	E
Agua de refrigeración de molino 2	3.8748E-05	ton	396	240	E
Vapor consumido por molino 2	8.8799E-02	MJ	397	242	E
Vapor de salida de molino 2	7.6896E-02	MJ	398	251	S
Agua de enfriamiento recuperada	3.8241E-05	ton	399	240	S
Fuga de agua de refrigeración de molino 2	5.0640E-07	ton	400	250	S
Jugo recuperado 2	2.1310E-04	ton	401	249	S
Bagazo húmedo molino 2	3.2023E-04	ton	402	238	S
Tornillo grado	6.6683E-09	ton	403	244	E
Transporte de tornillo	6.9868E-07	tonkm	404	247	E
Electrodo 1360 de 5/32"	9.7696E-10	kg	405	243	E
Transporte de electrodo 1360 de 5/32"	5.6898E-06	kgkm	406	246	E
Emisión de Cr	3.4682E-10	g	407	252	S
Emisión de Mn	4.2009E-11	g	408	254	S
Emisión de Ni	1.5241E-10	g	409	255	S
Electrodo 1370 de 1/8"	9.7696E-10	kg	410	243	E
Transporte de electrodo 1370 de 1/8"	3.4584E-07	kgkm	411	246	E
Emisión de Cr	5.3244E-10	g	412	252	S
Emisión de Ni	4.1521E-10	g	413	255	S
Electrodo 7018 de 5/32"	1.9539E-09	kg	414	246	E
Transporte de electrodo 7018 de 5/32"	3.2513E-06	kgkm	415	246	E

Tabla 92. Resultados del ICV completo para el molino dos					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Emisión de Cr	1.9539E-11	g	416	252	S
Emisión de Mn	1.8797E-09	g	417	254	S
Oxígeno	2.6526E-11	ton	418	245	E
Transporte de oxígeno	3.9725E-07	tonkm	419	248	E

Fuente: elaboración propia

Tabla 93. Resultados del ICV completo para el molino tres					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Agua de imbibición molino 4	2.1310E-04	ton	420	261	E
Tornillo grado	2.3163E-10	ton	421	263	E
Transporte de tornillos	2.4270E-08	tonkm	422	264	E
Bagazo húmedo molino 2	3.2023E-04	ton	423	257	E
Energía eléctrica de donelly 4	1.9968E-04	kWh	424	259	E
Energía eléctrica de motor bomba de maceración 2	3.2815E-04	kWh	425	259	E
Agua de refrigeración molino 3	6.7080E-05	ton	426	260	E
Vapor consumido por molino 3	1.5373E-01	Mj	427	262	E
Vapor de salida de molino 3	1.3312E-01	Mj	428	267	S
Agua de enfriamiento recuperada	6.6717E-05	ton	429	268	S
Fuga de agua de refrigeración de molino 2	3.6349E-07	ton	430	266	S
Agua de imbibición molino 3	2.1310E-04	ton	431	265	S
Bagazo húmedo molino 3	3.2023E-04	ton	432	258	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 94. Resultados del ICV completo para el molino cuatro					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Bagazo húmedo molino 3	3.2023E-04	ton	433	269	E
Tornillos	1.7899E-09	ton	434	275	E
Transporte de tornillos	1.8754E-07	tonkm	435	279	E
Electrodo 1360 de 5/32"	6.8387E-09	kg	436	276	E
Transporte de electrodo 1360 de 5/32"	3.9829E-05	kgkm	437	280	E
Emisión de Cr	2.4278E-09	g	438	286	S
Emisión de Mn	2.9407E-10	g	439	288	S
Emisión de Ni	1.0668E-09	g	440	289	S
Electrodo 1370 de 1/8"	9.7696E-10	kg	441	276	E
Transporte de electrodo 1370 de 1/8"	3.4584E-07	kgkm	442	280	E
Emisión de Cr	5.3244E-10	g	443	286	S
Emisión de Ni	4.1521E-10	g	444	289	S
Electrodo 7018 de 5/32"	5.8618E-09	kg	445	276	E

Tabla 94. Resultados del ICV completo para el molino cuatro					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Transporte de electrodo 7018 de 5/32"	9.7540E-06	kgkm	446	280	E
Emisión de Cr	5.8618E-11	g	447	286	S
Emisión de Mn	5.6390E-09	g	448	288	S
Electrodo 27 de 1/8"	9.7696E-10	kg	449	276	E
Transporte de electrodo 27 de 1/8"	1.6257E-06	kgkm	450	280	E
Emisión de Cr	5.3244E-10	g	451	286	S
Emisión de Ni	4.1521E-11	g	452	289	S
Electrodo 2850 de 1/8"	5.8618E-10	kg	453	276	E
Transporte de electrodo 2850 de 1/8"	3.0259E-07	kgkm	454	280	E
Emisión de Cr	2.0809E-10	g	455	286	S
Emisión de Mn	2.5206E-11	g	456	288	S
Emisión de Ni	9.1444E-11	g	457	289	S
Oxígeno	2.6526E-11	ton	458	277	E
Transporte de oxígeno	3.9725E-07	kgkm	459	281	E
Gas LP	6.0880E-11	ton	460	278	E
Transporte de gas LP	2.2290E-08	tonkm	461	282	E
Agua de imbibición molino 5	1.8797E-04	ton	462	283	E
Energía eléctrica de donelly 5	2.6252E-04	kWh	463	271	E
Energía eléctrica de motor de bomba maceración 3	3.2815E-04	kWh	464	271	E
Agua de refrigeración molino 4	6.7080E-05	ton	465	272	E
Vapor consumido por molino 4	1.5373E-01	MJ	466	273	E
Vapor de salida de molino 4	1.3312E-01	MJ	467	285	S
Agua de enfriamiento recuperada	6.4764E-05	ton	468	290	S
Fuga de agua de refrigeración de molino 4	2.3163E-06	L	469	284	S
Bagazo húmedo molino 4	3.2023E-04	ton	470	270	S
Agua de imbibición molino 4	2.1310E-04	ton	471	283	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 95. Resultados del ICV completo para el molino cinco					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Bagazo húmedo molino 4	3.2023E-04	ton	472	291	E
Tornillo grado	1.1371E-09	ton	473	297	E
Transporte de tornillo	1.1914E-07	tonkm	474	301	E
Aceite hidráulico mh-300	1.7292E-12	ton	475	298	E
Transporte de aceite	4.2885E-10	tonkm	476	302	E
Electrodo 1360 de 5/32"	3.9078E-09	kg	477	299	E
Transporte de 1360 de 5/32"	2.2759E-05	kgkm	478	303	E

Tabla 95. Resultados del ICV completo para el molino cinco					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Emisión de Cr	1.3873E-09	g	479	308	S
Emisión de Mn	1.6804E-10	g	480	310	S
Emisión de Ni	6.0962E-10	g	481	311	S
Electrodo 1370 de 1/8"	1.9539E-09	kg	482	299	E
Transporte de 1370 de 1/8"	6.9169E-07	kgkm	483	303	E
Emisión de Cr	1.0649E-09	g	484	308	S
Emisión de Ni	8.3042E-10	g	485	311	S
Electrodo 6010 de 1/8"	3.9078E-09	kg	486	299	E
Transporte de 6010 de 1/8"	2.1134E-05	kgkm	487	303	E
Emisión de Cr	1.5631E-11	g	488	308	S
Emisión de Co	3.9078E-12	g	489	309	S
Emisión de Mn	3.4584E-09	g	490	310	S
Emisión de Ni	2.3447E-11	g	491	311	S
Electrodo 7018 de 5/32"	1.9539E-08	kg	492	299	E
Transporte de 7018 de 5/32"	3.2513E-05	kgkm	493	303	S
Emisión de Cr	1.9539E-10	g	494	308	S
Emisión de Mn	1.8797E-08	g	495	310	S
Oxígeno	1.3263E-10	ton	496	304	E
Transporte de oxígeno	1.9862E-06	tonkm	497	304	E
Agua de imbibición	1.7357E-04	ton	498	295	E
Energía eléctrica de donelly 6	2.0122E-04	kWh	499	293	E
Energía eléctrica de bomba de agua de imbibición	3.2815E-04	kWh	500	293	E
Agua de refrigeración molino 5	3.5519E-05	ton	501	294	E
Vapor consumido por molino 5	8.1399E-02	MJ	502	296	E
Vapor de salida de molino 5	7.0488E-02	MJ	503	307	S
Agua de enfriamiento recuperada	3.5397E-05	ton	504	312	S
Fuga de agua de refrigeración de molino 5	1.2191E-07	ton	505	306	S
Bagazo húmedo molino 5	2.8069E-04	ton	506	292	S
Agua de imbibición molino 5	2.1310E-04	ton	507	305	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 96. Resultados del ICV completo para el tanque de jugo mezclado					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Jugo molino 1	6.8480E-04	ton	508	313	E
Jugo molino 2	2.1310E-04	ton	509	314	E
Tornillos	3.0323E-09	ton	510	317	E
Transporte	3.1771E-07	tonkm	511	319	E
Electrodo 508 de 1/8"	2.9309E-09	kg	512	320	E

Tabla 96. Resultados del ICV completo para el tanque de jugo mezclado					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Transporte de 508 de 1/8"	6.9169E-07	kgkm	513	320	E
Emisión de Cr	1.0405E-09	g	514	321	S
Emisión de Mn	1.2603E-10	g	515	323	S
Emisión de Ni	4.5722E-10	g	516	324	S
Electrodo 508 de 3/32"	9.7696E-10	kg	517	320	E
Transporte de 508 de 3/32"	3.4584E-07	kgkm	518	320	E
Emisión de Cr	3.4682E-10	g	519	321	S
Emisión de Mn	4.2009E-11	g	520	323	S
Emisión de Ni	1.5241E-10	g	521	324	S
Electrodo 7018 de 5/32"	1.9539E-09	kg	522	320	E
Transporte de 7018 de 5/32"	3.2513E-06	kgkm	523	320	E
Emisión de Cr	1.9539E-11	g	524	321	S
Emisión de Mn	1.8797E-09	g	525	323	S
Energía eléctrica de colador	5.2167E-04	kWh	526	316	E
Energía eléctrica de bomba de jugo mezclado	9.7294E-04	kWh	527	316	E
Jugo mezclado saliente	8.9790E-04	ton	528	315	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 97. Resultados del ICV completo para los coladores de jugo					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Jugo mezclado	8.9790E-04	ton	529	325	E
Tornillo grado	1.7899E-09	ton	530	327	E
Transporte de tornillo	1.8754E-07	tonkm	531	330	E
Electrodo 7018 de 5/32"	5.8618E-09	kg	532	328	E
Transporte de 7018 de 5/32"	9.7540E-06	kgkm	533	331	E
Emisión de Cr	5.8618E-11	g	534	333	S
Emisión de Mn	5.6390E-09	g	535	334	S
Oxígeno	5.3051E-11	ton	536	329	E
Transporte de oxígeno	7.9449E-07	tonkm	537	332	E
Jugo colado	8.9790E-04	ton	538	326	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 98. Resultados del ICV completo para los servicios generales en molienda					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Placa de acero al carbón	1.0165E-08	ton	539	335	E
Transporte de placa de acero	2.1285E-06	tonkm	540	346	E
Tornillo grado 5	5.5171E-08	ton	541	336	E
Transporte de tornillo	1.6332E-05	tonkm	542	347	E

Tabla 98. Resultados del ICV completo para los servicios generales en molienda					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Grasa XHP 222	2.7355E-10	ton	543	337	E
Transporte de grasa XHP 222	5.9699E-08	tonkm	544	348	E
Grasa dynagear 2000	4.2537E-09	ton	545	337	E
Transporte de grasa dynagear 2000	3.9286E-06	tonkm	546	348	E
Grasa NH 00	1.4733E-09	ton	547	337	E
Transporte de grasa NH 00	7.9934E-06	tonkm	548	348	E
Arandela acero	1.1724E-10	ton	549	338	E
Transporte de arandela de acero	1.7182E-05	tonkm	550	349	E
Aceite mobilgear 600 220	3.9078E-08	ton	551	339	E
Transporte de aceite mobilgear 600 220	1.2996E-05	tonkm	552	350	E
Aceite mobilgear 600 460	1.3091E-07	ton	553	339	E
Transporte de aceite mobilgear 600 460	4.4024E-05	tonkm	554	350	E
Aceite hidráulico mh-300	5.1877E-10	ton	555	339	E
Transporte de aceite hidráulico mh-300	1.2865E-07	tonkm	556	350	E
Aceite mobilgear 600 320	8.9685E-11	ton	557	339	E
Transporte de aceite mobilgear 600 320	4.7147E-08	tonkm	558	350	E
Aceite mobilgear 600 68	1.7710E-10	ton	559	339	E
Transporte de aceite mobilgear 600 68	1.0344E-06	tonkm	560	350	E
Aceite turbinas 15	1.1193E-10	ton	561	339	E
Transporte de aceite turbinas 15	4.7468E-08	tonkm	562	350	E
Cincho de plástico	2.2712E-17	ton	563	340	E
Transporte de cincho de plástico	1.1167E-05	tonkm	564	351	E
Solera de acero	2.2405E-09	ton	565	341	E
Transporte de solera de acero	5.8809E-06	tonkm	566	352	E
Electrodo 1360 de 5/32"	1.0356E-07	kg	567	342	E
Transporte de electrodo 1360 de 5/32"	6.0312E-04	kgkm	568	353	E
Emisión de Cr	3.6763E-08	g	569	357	S
Emisión de Mn	4.4530E-09	g	570	359	S
Emisión de Ni	1.6155E-08	g	571	360	S
Electrodo 1370 de 1/8"	3.0481E-07	kg	572	342	E
Transporte de electrodo 1370 de 1/8"	1.0790E-04	kgkm	573	353	E
Emisión de Cr	1.6612E-07	g	574	357	S
Emisión de Ni	1.2955E-07	g	575	360	S
Electrodo 508 de 1/8"	4.8262E-08	kg	576	342	E
Transporte de electrodo 508 de 1/8"	1.1390E-05	kgkm	577	353	E
Emisión de Cr	1.7133E-08	g	578	357	S
Emisión de Mn	2.0753E-09	g	579	359	S
Emisión de Ni	7.5289E-09	g	580	360	S

Tabla 98. Resultados del ICV completo para los servicios generales en molienda					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Electrodo 508 de 3/32"	1.3677E-08	kg	581	342	E
Transporte de electrodo 508 de 3/32"	4.8418E-06	kgkm	582	353	E
Emisión de Cr	4.8555E-09	g	583	357	S
Emisión de Mn	5.8813E-10	g	584	359	S
Emisión de Ni	2.1337E-09	g	585	360	S
Electrodo 6010 de 1/8"	1.9051E-07	kg	586	342	E
Transporte de electrodo 6010 de 1/8"	1.0303E-03	kgkm	587	353	E
Emisión de Cr	7.6203E-10	g	588	357	S
Emisión de Co	1.9051E-10	g	589	358	S
Emisión de Mn	1.6860E-07	g	590	359	S
Emisión de Ni	1.1430E-09	g	591	360	S
Electrodo 6010 de 5/32"	6.1549E-08	kg	592	342	E
Transporte de electrodo 6010 de 5/32"	2.8165E-04	kgkm	593	353	E
Emisión de Cr	2.4619E-10	g	594	357	S
Emisión de Co	6.1549E-11	g	595	358	S
Emisión de Mn	5.4471E-08	g	596	359	S
Emisión de Ni	3.6929E-10	g	597	360	S
Electrodo 6013 de 1/8"	5.4514E-07	kg	598	342	E
Transporte de electrodo 6013 de 1/8"	2.2678E-04	kgkm	599	353	E
Emisión de Cr	1.3083E-08	g	600	357	S
Emisión de Mn	5.6150E-07	g	601	359	S
Electrodo 7018 de 5/32"	6.4480E-08	kg	602	342	E
Transporte de electrodo 7018 de 5/32"	1.0729E-04	kgkm	603	353	E
Emisión de Cr	1.5475E-09	g	604	357	S
Emisión de Mn	6.6414E-08	g	605	359	S
Electrodo 27 de 1/8"	7.1318E-08	kg	606	342	E
Transporte de electrodo 27 de 1/8"	1.1867E-04	kgkm	607	353	E
Emisión de Cr	3.8868E-08	g	608	357	S
Emisión de Ni	3.0310E-09	g	609	360	S
Electrodo 7007 de 1/8"	4.1912E-07	kg	610	342	E
Transporte de electrodo 7007 de 1/8"	5.5156E-04	kgkm	611	353	E
Emisión de Cr	2.2842E-07	g	612	357	S
Emisión de Ni	1.7812E-08	g	613	360	S
Electrodo 2850 de 1/8"	3.5855E-08	kg	614	342	E
Transporte de electrodo 2850 de 1/8"	4.7406E-06	kgkm	615	353	E
Emisión de Cr	1.2728E-08	g	616	357	S
Emisión de Mn	1.5417E-09	g	617	359	S
Emisión de Ni	5.5933E-09	g	618	360	S

Tabla 98. Resultados del ICV completo para los servicios generales en molienda					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Electrodo 4040 de 1/8"	1.9266E-07	kg	619	342	E
Transporte de electrodo 4040 de 1/8"	5.0210E-06	kgkm	620	353	E
Emisión de Cr	6.8393E-08	g	621	357	S
Emisión de Mn	8.2842E-09	g	622	359	S
Emisión de Ni	3.0054E-08	g	623	360	S
Oxígeno	2.2295E-09	ton	624	343	E
Transporte de oxígeno	3.3390E-05	tonkm	625	354	E
Gas LP	4.2426E-10	ton	626	344	E
Transporte de gas LP	1.5533E-07	tonkm	627	355	E
Oxido de calcio	6.9950E-10	ton	628	345	E
Transporte de óxido de calcio	2.8054E-07	tonkm	629	356	E

Fuente: elaboración propia

Tabla 99. Resultados completos del ICV para el conductor de bagazo uno					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Bagazo proveniente de molino 5	1.8411E+00	ton	630	361	E
Tornillos de acero	5.3459E-13	ton	631	364	E
Transporte de tornillos de acero	3.5057E-07	tonkm	632	366	E
Solera de acero	1.5631E-10	ton	633	365	E
Transporte de solera de acero	2.9656E-07	tonkm	634	367	E
Bagazo saliente de conductor I	1.8411E+00	ton	635	362	E
Energía eléctrica	3.8959E-04	kWh	636	363	E

Fuente: elaboración propia

Tabla 100. Resultados completos del ICV para el conductor de bagazo dos					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Bagazo saliente de conductor I	1.8411E+00	ton	637	396	E
Arandelas de acero	4.3612E-13	ton	638	371	E
Transporte de arandelas de acero	1.0546E-06	tonkm	639	375	E
Tornillos de acero	2.9543E-13	ton	640	372	E
Transporte de tornillos de acero	1.9374E-07	tonkm	641	376	E
Solera de acero	1.5631E-10	ton	642	373	E
Transporte de solera de acero	2.9656E-07	tonkm	643	377	E
Electrodo 6010 de 1/8"	1.9539E-09	kg	644	374	E
Transporte de electrodo 6010 de 1/8"	1.1380E-05	kgkm	645	378	E
Emisión de Cr	6.9364E-10	g	646	379	S
Emisión de Mn	8.4019E-11	g	647	380	S
Emisión de Ni	3.0481E-10	g	648	381	S
Energía eléctrica	6.7817E-04	kWh	649	370	E

Tabla 100. Resultados completos del ICV para el conductor de bagazo dos					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Bagazo saliente de conductor 2	1.8411E+00	ton	650	369	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 101. Resultados completos del ICV para el secador de bagazo					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Bagazo proveniente de conductor de bagazo 2	1.8411E+00	MJ	651	382	E
Gas de combustión prov. De int. Camb. 1	5.2845E-02	MJ	652	387	E
Gas de combustión prov. De int. Camb. 2	6.5529E-02	MJ	653	388	E
Ceniza de intercambiador 1	1.4992E-06	ton	654	389	E
Ceniza de intercambiador 2	1.8591E-06	ton	655	389	E
Tornillos de acero	1.4068E-13	ton	656	391	E
Transporte de tornillos de acero - secador	9.2256E-08	tonkm	657	393	E
Electrodo 6010 de 1/8"	1.9539E-09	kg	658	392	E
Transporte de electrodo 6010 de 1/8"	1.1380E-05	kgkm	659	394	E
Emisión de Cr	6.9364E-10	g	660	395	S
Emisión de Mn	8.4019E-11	g	661	396	S
Emisión de Ni	3.0481E-10	g	662	397	S
Bagazo saliente a Caldera 1	7.5369E-01	MJ	663	383	S
Bagazo saliente a Caldera 2	9.3459E-01	MJ	664	384	S
Bagazo a almacén	1.7600E-01	MJ	665	385	S
Gas de combustión a chimenea 1 - atmósfera	1.5042E-01	MJ	666	398	S
Pérdida de energía a la atmósfera	2.9593E-02	MJ	667	400	S
Gas de combustión a chimenea 2 - atmósfera	1.8653E-01	MJ	668	399	S
Agua removida de intercambiador 1	2.0135E-06	ton	669	401	S
Agua removida de intercambiador 2	2.4968E-06	ton	670	402	S
Ceniza hacia chimenea 1	1.4992E-06	ton	671	403	S
Ceniza hacia chimenea 2	1.8591E-06	ton	672	404	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 102. Resultados completos del ICV para la caldera uno					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Tornillos de acero	1.1255E-13	ton	673	484	E
Transporte de tornillos de acero - caldera 1	7.3805E-08	tonkm	674	488	E
Concreto refractario mizzou	9.7696E-11	ton	675	485	E
Transporte de concreto refractario mizzou	1.1267E-06	tonkm	676	489	E
Concreto refractario kast set	4.8848E-11	ton	677	485	E
Transporte de concreto refractario kast set	3.8435E-07	tonkm	678	489	E
Electrodo 508 de 1/8"	9.7696E-10	kg	679	486	E

Tabla 102. Resultados completos del ICV para la caldera uno					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Transporte de electrodo 508 de 1/8"	2.3056E-07	kgKm	680	490	E
Emisión de Cr	3.4682E-10	g	681	492	S
Emisión de Mn	4.2009E-11	g	682	494	S
Emisión de Ni	1.5241E-10	g	683	495	S
Electrodo 6010 de 1/8"	1.9539E-09	kg	684	486	E
Transporte de electrodo 6010 de 1/8"	1.1380E-05	kgKm	685	490	E
Emisión de Cr	7.8157E-12	g	686	492	S
Emisión de Co	1.9539E-12	g	687	493	S
Emisión de Mn	1.7292E-09	g	688	494	S
Emisión de Ni	1.1724E-11	g	689	495	S
Electrodo 6010 de 5/32"	5.8618E-09	kg	690	486	E
Transporte de electrodo 6010 de 5/32"	2.6823E-05	kgKm	691	490	E
Emisión de Cr	2.3447E-11	g	692	492	S
Emisión de Co	5.8618E-12	g	693	493	S
Emisión de Mn	5.1877E-09	g	694	494	S
Emisión de Ni	3.5171E-11	g	695	495	S
Electrodo 7018 de 1/8"	2.3447E-08	kg	696	486	E
Transporte de electrodo 7018 de 1/8"	2.4385E-04	kgKm	697	490	E
Emisión de Cr	2.3447E-10	g	698	492	S
Emisión de Mn	2.2556E-08	g	699	494	S
Oxígeno	7.6784E-11	ton	700	487	E
Transporte de oxígeno - caldera I	1.1499E-06	tonkm	701	491	E
Bagazo entrante a caldera I	7.5369E-01	MJ	702	405	E
Aire caliente	8.5098E-02	MJ	703	471	E
Agua para caldera I	1.9631E-04	ton	704	407	E
Agua de tratamiento	1.1049E-06	ton	705	409	E
Energía eléctrica (ventilador tiro fluidizado)	9.5968E-04	kVWh	706	406	E
Agua perdida	7.9255E-06	ton	707	410	S
Vapor generado	5.3415E-01	MJ	708	409	E
Pérdida de energía - calor sensible	1.8392E-01	MJ	709	473-474	S
Pérdida de energía - combustión incompleta	1.6852E-05	MJ	710	475-476	S
Pérdida de energía - radiación	4.2393E-03	MJ	711	477-478	S
Cenizas en gas de combustión	5.3255E-04	MJ	712	479-480	S
Pérdida de energía - ceniza	2.8228E-04	MJ	713	479-480	S
Pérdida de energía - calentamiento de agua	1.1550E-01	MJ	714	481-482	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 103. Resultados completos del ICV para el intercambiador I					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Aire ambiente	6.0112E-04	ton	715	496	E
Energía en flujo por calentamiento de agua	1.1550E-01	MJ	716	499	E
Cenizas proveniente de quemador I	5.3255E-04	MJ	717	501	E
Gases de combustión	1.8392E-01	MJ	718	500	E
Energía eléctrica (ventilador tiro forzado)	6.3689E-04	kWh	719	498	E
Aire caliente	8.5098E-02	MJ	720	497	S
Cenizas hacia el secador	1.4992E-06	ton	721	504	S
Gases de combustión a secador	5.2845E-02	MJ	722	503	S
Pérdida de energía en intercambiador	4.5981E-02	MJ	723	502	S
Agua removida en bagazo - caldera I	1.1550E-01	MJ	724	505	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 104. Resultados completos del ICV para la chimenea I					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Agua arrastrada de int. I a chim entrada	2.0135E-06	ton	725	507	E
Ceniza	1.4992E-06	ton	726	508	E
Energía eléctrica (ventilador de tiro inducido)	1.5922E-03	kWh	727	509	E
Energía eléctrica (colectores de partículas)	3.6621E-05	kWh	728	509	E
Ceniza emitida a la atmósfera	3.9393E-07	ton	729	526	S
Energía no aprovechada en gas de combustión	1.5042E-01	MJ	730	511	S
Ceniza recuperada en colectores	1.1053E-06	ton	731	510	S
SO ₂ emitido por caldera I	8.5127E-11	ton	732	512	S
NO _x emitido por caldera I	1.8715E-10	ton	733	513	S
Partículas suspendidas totales por caldera I	2.7346E-09	ton	734	514	S
CO emitido por caldera I	1.7781E-09	ton	735	515	S
CO ₂ emitido por caldera I	6.2629E-07	ton	736	516	S
Agua removida	2.0135E-06	ton	737	525	S
Al ₂ O ₃	9.9270E-09	ton	738	517	S
SO ₃	8.1938E-09	ton	739	518	S
MgO	6.5786E-09	ton	740	519	S
P ₂ O ₅	6.4211E-09	ton	741	520	S
Fe ₂ O ₃	4.8847E-09	ton	742	521	S
MnO	1.7727E-09	ton	743	522	S
Cl	1.3000E-09	ton	744	523	S
Zn	3.5454E-10	ton	745	524	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 105. Resultados completos del ICV para el tanque de dosificación					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Agua	2.7281E-06	ton	746	527	E
Arandelas de acero	5.8618E-13	ton	747	531	E
Transporte de arandelas de acero - tanque de dosificación	1.7009E-07	tonkm	748	536	E
Tornillos de acero	7.3858E-12	ton	749	532	E
Transporte	5.8122E-07	tonkm	750	537	E
Antiespumante 200	3.4506E-09	ton	751	533	E
Transporte de antiespumante 200	1.2320E-05	tonkm	752	538	E
Acondicionador de lodos 210	3.9489E-09	ton	753	534	E
Transporte de acondicionador de lodos	8.8283E-06	tonkm	754	540	E
Sosa caustica en escamas	3.4451E-09	ton	755	535	E
Transporte de sosa	1.6580E-06	tonkm	756	539	E
Energía eléctrica (bomba dosificadora)	6.8607E-06	kWh	757	530	E
Energía eléctrica (bomba de agitación)	1.8311E-05	kWh	758	530	E
Agua de tratamiento a caldera 1	1.1049E-06	ton	759	528	S
Agua de tratamiento a caldera 2	1.6232E-06	ton	760	529	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 106. Resultados completos del ICV para el tanque de condensados puros					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Agua	3.6352E-04	ton	761	541	E
Energía eléctrica (bomba de condensados puros)	5.0498E-04	kWh	762	543	E
Agua	3.6352E-04	ton	763	542	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 107. Resultados completos del ICV para el tanque de almacenamiento de agua					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Agua	4.0392E-05	ton	764	544	E
Energía eléctrica (bomba de reposición)	2.0022E-04	kWh	765	546	E
Solera de acero	4.0704E-10	ton	766	547	E
Transporte de solera	7.7224E-07	tonkm	767	548	E
Agua	4.0392E-05	ton	768	545	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 108. Resultados completos del ICV para el deareador					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Agua de condensados	3.6352E-04	ton	769	549	E
Agua de tanque de reposición	4.0392E-05	ton	770	549	E

Tabla 108. Resultados completos del ICV para el deareador					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Energía eléctrica (bomba de alimentación)	2.4138E-03	kWh	771	552	E
Arandelas de acero	2.9895E-12	ton	772	553	E
Transporte de arandelas de acero - deareador	8.6747E-07	tonkm	773	557	E
Tornillos de acero	1.3834E-11	ton	774	554	E
Transporte de tornillos de acero - deareador	1.0886E-06	tonkm	775	558	E
Electrodo 6010 de 1/8"	2.9309E-09	kg	776	555	E
Transporte de electrodo 6010 de 1/8"	1.7069E-05	kgkm	777	559	E
Emisión de Cr	1.1724E-11	g	778	561	S
Emisión de Co	2.9309E-12	g	779	562	S
Emisión de Mn	2.5938E-09	g	780	563	S
Emisión de Ni	1.7585E-11	g	781	564	S
Electrodo 6010 de 5/32"	9.7696E-09	kg	782	555	E
Transporte de electrodo 6010 de 5/32"	4.4706E-05	kgkm	783	559	E
Emisión de Cr	3.9078E-11	g	784	561	S
Emisión de Co	9.7696E-12	g	785	562	S
Emisión de Mn	8.6461E-09	g	786	563	S
Emisión de Ni	5.8618E-11	g	787	564	S
Electrodo 7018 de 1/8"	1.9539E-09	kg	788	555	E
Transporte de electrodo 7018 de 1/8"	2.0321E-05	kgkm	789	559	E
Emisión de Cr	1.9539E-11	g	790	561	S
Emisión de Mn	1.8797E-09	g	791	563	S
Oxígeno	2.6526E-11	ton	792	556	E
Transporte de oxígeno - deareador	3.9725E-07	tonkm	793	560	E
Agua para caldera 1	1.6359E-04	ton	794	550	S
Agua para caldera 2	2.4033E-04	ton	795	551	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 109. Resultados completos del ICV para la caldera dos					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Tornillos de acero	1.1255E-13	ton	796	484	E
Transporte de tornillos de acero – caldera 1	7.3805E-08	tonkm	797	488	E
Concreto refractario mizzou	9.7696E-11	ton	798	485	E
Transporte de concreto refractario mizzou	1.1267E-06	tonkm	799	489	E
Concreto refractario kast set	4.8848E-11	ton	800	485	E
Transporte de concreto refractario kast set	3.8435E-07	tonkm	801	489	E
Electrodo 508 de 1/8"	9.7696E-10	kg	802	486	E
Transporte de electrodo 508 de 1/8"	2.3056E-07	kgKm	803	490	E
Emisión de Cr	3.4682E-10	g	804	492	S

Tabla 109. Resultados completos del ICV para la caldera dos					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Emisión de Mn	4.2009E-11	g	805	494	S
Emisión de Ni	1.5241E-10	g	806	495	S
Electrodo 6010 de 1/8"	1.9539E-09	kg	807	486	E
Transporte de electrodo 6010 de 1/8"	1.1380E-05	kgkm	808	490	E
Emisión de Cr	7.8157E-12	g	809	492	S
Emisión de Co	1.9539E-12	g	810	493	S
Emisión de Mn	1.7292E-09	g	811	494	S
Emisión de Ni	1.1724E-11	g	812	495	S
Electrodo 6010 de 5/32"	5.8618E-09	kg	813	486	E
Transporte de electrodo 6010 de 5/32"	2.6823E-05	kgkm	814	490	E
Emisión de Cr	2.3447E-11	g	815	492	S
Emisión de Co	5.8618E-12	g	816	493	S
Emisión de Mn	5.1877E-09	g	817	494	S
Emisión de Ni	3.5171E-11	g	818	495	S
Electrodo 7018 de 1/8"	2.3447E-08	kg	819	486	E
Transporte de electrodo 7018 de 1/8"	2.4385E-04	kgkm	820	490	E
Emisión de Cr	2.3447E-10	g	821	492	S
Emisión de Mn	2.2556E-08	g	822	494	S
Oxígeno	7.6784E-11	ton	823	487	E
Transporte de oxígeno – caldera 2	1.1499E-06	tonkm	824	491	E
Bagazo entrante a caldera 2	9.3459E-01	MJ	825	405	E
Aire caliente	1.0552E-01	MJ	826	471	E
Agua para caldera 2	9.5030E-06	ton	827	407	E
Agua de tratamiento	1.6232E-06	ton	828	409	E
Energía eléctrica (ventilador tiro fluidizado)	9.5968E-04	kWh	829	406	E
Agua perdida	7.9255E-06	ton	830	410	S
Vapor generado	5.3415E-01	MJ	831	409	E
Pérdida de energía – calor sensible	2.2807E-01	MJ	832	473-474	S
Pérdida de energía – combustión incompleta	2.0897E-05	MJ	833	475-476	S
Pérdida de energía – radiación	5.2568E-03	MJ	834	477-478	S
Cenizas en gas de combustión	6.6037E-04	MJ	835	479-480	S
Pérdida de energía – ceniza	3.5004E-04	MJ	836	479-480	S
Pérdida de energía – calentamiento de agua	1.4323E-01	MJ	837	481-482	S

Fuente: elaboración propia

Tabla I 10. Resultados completos del ICV para el intercambiador 2					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Aire ambiente	7.4540E-04	ton	838	496	E
Energía en flujo por calentamiento de agua 2	1.4323E-01	MJ	839	499	E
Cenizas proveniente de quemador 2	6.6037E-04	MJ	840	501	E
Gases de combustión	2.2807E-01	MJ	841	500	E
Energía eléctrica (ventilador tiro forzado)	1.6147E-03	kWh	842	498	E
Aire caliente	1.0552E-01	MJ	843	497	S
Cenizas hacia el secador	1.8591E-06	ton	844	504	S
Gases de combustión a secador	6.5529E-02	MJ	845	503	S
Perdida de energía en intercambiador	5.7017E-02	MJ	846	502	S
Agua removida en bagazo - caldera 2	1.4323E-01	MJ	847	505	S

Fuente: elaboración propia

Tabla I 11. Resultados completos del ICV para la chimenea 2					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Agua arrastrada de int 2. entrada	2.4968E-06	ton	848	507	E
Ceniza emitida a la atmósfera	1.8591E-06	ton	849	508	E
Energía eléctrica (ventilador de tiro inducido)	3.2294E-03	kWh	850	509	E
Energía eléctrica (colectores de partículas)	1.9973E-05	kWh	851	509	E
Cenizas emitidas a la atmósfera	4.8848E-07	ton	852	526	S
Energía no aprovechada en gas de combustión	1.8653E-01	MJ	853	511	S
Cenizas recuperadas en colectores	1.3706E-06	ton	854	510	S
SO _x emitido por caldera 2	1.8609E-10	ton	855	512	S
NO _x emitido por caldera 2	6.0146E-10	ton	856	513	S
Partículas suspendidas totales por caldera 2	7.3538E-09	ton	857	514	S
CO emitido por caldera 2	4.7964E-09	ton	858	515	S
CO ₂ emitido por caldera 2	1.6856E-06	ton	859	516	S
Agua removida	2.4968E-06	ton	860	525	S
Al ₂ O ₃	1.2310E-08	ton	861	517	S
SO ₃	1.0160E-08	ton	862	518	S
MgO	8.1577E-09	ton	863	519	S
P ₂ O ₅	7.9623E-09	ton	864	520	S
Fe ₂ O ₃	6.0572E-09	ton	865	521	S
MnO	2.1982E-09	ton	866	522	S
Cl	1.6120E-09	ton	867	523	S
Zn	4.3963E-10	ton	868	524	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 112. Resultados completos del ICV para los vehículos					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Aceite mobilgear 600 220	2.0962E-11	ton	869	565	E
Transporte de aceite mobilgear 600 220	6.9712E-09	tonkm	870	566	E
Aceite hidraulico mh-300	2.5247E-10	ton	871	565	E
Transporte de aceite hidráulico mh-300	5.5411E-08	tonkm	872	566	E
Aceite mobil delvac 25w-50	1.4690E-10	ton	873	565	E
Transporte de aceite mobil delvac 25w-50	8.2573E-07	tonkm	874	566	E
Aceite mobilgear 600 320	4.7480E-11	ton	875	565	E
Transporte de aceite mobilgear 600 320	8.6667E-07	tonkm	876	566	E

Fuente: elaboración propia

Tabla 113. Resultados completos del ICV para el laboratorio					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Electrodo 6010 de 1/8"	1.9539E-09	kg	877	557	E
Transporte de electrodo 6010 de 1/8"	1.1380E-05	kgkm	878	569	E
Emisión de Cr	7.8157E-12	g	879	571	S
Emisión de Co	1.9539E-12	g	880	572	S
Emisión de Mn	1.7292E-09	g	881	573	S
Emisión de ni	1.1724E-11	g	882	574	S
Electrodo 7018 de 1/8"	3.9078E-09	kg	883	557	E
Transporte de electrodo 7018 de 1/8"	4.0642E-05	kgkm	884	569	E
Emisión de Cr	3.9078E-11	g	885	574	S
Emisión de Mn	3.7594E-09	g	886	573	S
Oxígeno	1.0610E-10	ton	887	568	E
Transporte de oxígeno - laboratorio	1.5890E-06	tonkm	888	570	E

Tabla 114. Resultados completos del ICV de los servicios en general					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Placa de acero al carbón	1.7859E-08	ton	889	575	
Transporte de placa de acero al carbón	4.8731E-06	tonkm	890	588	
Arandelas de acero	2.1697E-10	ton	891	576	
Transporte de arandelas de acero	6.2960E-05	tonkm	892	589	
Tornillos de acero	7.2053E-10	ton	893	577	
Transporte de tornillos de acero	5.6701E-05	tonkm	894	590	
Ladrillo de barro rojo	1.9860E-08	ton	895	578	
Transporte de ladrillo de barro rojo	9.0592E-07	tonkm	896	591	E
Solera de acero	5.9801E-09	ton	897	579	E
Transporte de solera de acero	1.1346E-05	tonkm	898	592	E

Tabla 114. Resultados completos del ICV de los servicios en general					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Concreto refractario mizzou	3.9567E-09	ton	899	580	E
Transporte de concreto refractario mizzou	4.5629E-05	tonkm	900	593	E
Concreto refractario kast set	2.4424E-09	ton	901	580	E
Transporte (tonkm)	1.9217E-05	tonkm	902	593	E
Electrodo 1360 de 5/32"	4.8848E-08	kg	903	581	E
Transporte de electrodo	2.8449E-04	kgkm	904	594	E
Emisión de Cr	1.7341E-08	g	905	601	S
Emisión de Mn	2.1005E-09	g	906	603	S
Emisión de Ni	7.6203E-09	g	907	604	S
Electrodo 508 de 1/8"	1.5964E-08	kg	908	581	E
Transporte de electrodo 508 de 1/8"	3.7674E-06	kgkm	909	594	E
Emisión de Cr	5.6671E-09	g	910	601	S
Emisión de Mn	6.8643E-10	g	911	603	S
Emisión de Ni	2.4903E-09	g	912	604	S
Electrodo 508 de 3/32"	5.8618E-09	kg	913	581	E
Transporte de electrodo 508 de 3/32"	2.0751E-06	kgkm	914	594	E
Emisión de Cr	2.0809E-09	g	915	601	S
Emisión de Mn	2.5206E-10	g	916	603	S
Emisión de Ni	9.1444E-10	g	917	604	S
Electrodo 6010 de 1/8"	3.1067E-07	kg	918	581	E
Transporte de electrodo	1.8094E-03	kgkm	919	594	E
Emisión de Cr	1.2427E-09	g	920	601	S
Emisión de Co	3.1067E-10	g	921	602	S
Emisión de Mn	2.7495E-07	g	922	603	S
Emisión de Ni	1.8640E-09	g	923	604	S
Electrodo 6010 de 5/32"	3.9078E-07	kg	924	581	E
Transporte de electrodo	1.7882E-03	kgkm	925	594	E
Emisión de Cr	1.5631E-09	g	926	601	S
Emisión de Co	3.9078E-10	g	927	602	S
Emisión de Mn	3.4584E-07	g	928	603	S
Emisión de Ni	2.3447E-09	g	929	604	S
Electrodo 6013 de 1/8"	1.7585E-08	kg	930	581	E
Transporte de electrodo 6013 de 1/8"	7.3155E-06	kgkm	931	594	E
Emisión de Cr	4.2205E-10	g	932	601	S
Emisión de Mn	1.8113E-08	g	933	603	S
Electrodo 7018 de 1/8"	7.6486E-07	kg	934	581	E
Transporte de electrodo 7018 de 1/8"	7.9546E-03	kgkm	935	594	E
Emisión de Cr	7.6486E-09	g	936	601	S

Tabla 114. Resultados completos del ICV de los servicios en general					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Emisión de Mn	7.3580E-07	g	937	603	S
Electrodo 7018 de 3/32"	1.6608E-08	kg	938	581	E
Transporte de electrodo 7018 de 3/32"	2.0727E-05	kgkm	939	594	E
Emisión de Cr	1.6608E-10	g	940	601	S
Emisión de Mn	1.5977E-08	g	941	603	S
Electrodo 7018 de 5/32"	7.7180E-08	kg	942	581	E
Transporte de electrodo 7018 de 5/32"	1.2843E-04	kgkm	943	594	E
Emisión de Cr	7.7180E-10	g	944	601	S
Emisión de Mn	7.4247E-08	g	945	603	S
Aceite mobilgear 600 220	4.8911E-11	ton	946	582	E
Transporte de aceite mobilgear 600 220	1.6266E-08	tonkm	947	595	E
Aceite hidráulico mh-300	1.5822E-09	ton	948	582	E
Transporte de aceite hidráulico mh-300	3.4727E-07	tonkm	949	595	E
Aceite mobil delvac 25w-50	4.0921E-10	ton	950	582	E
Transporte de aceite mobil delvac 25w-50	2.3002E-06	tonkm	951	595	E
Aceite mobil fluid 424	1.7882E-10	ton	952	582	E
Transporte de aceite mobil fluid 424	2.2354E-07	tonkm	953	595	E
Aceite mobilgear 600 320	8.7927E-12	ton	954	582	E
Transporte de aceite mobilgear 600 320	1.6049E-07	tonkm	955	595	E
Grasa mobil XHP 222	1.7976E-10	ton	956	583	E
Transporte de grasa mobil XHP 222	3.9231E-08	tonkm	957	596	E
Gas LP	1.1827E-09	ton	958	584	E
Transporte de gas LP	8.0185E-07	tonkm	959	597	E
Oxígeno	4.4214E-09	ton	960	585	E
Transporte de oxígeno	6.6215E-05	tonkm	961	598	E
Calhidra	1.4166E-09	ton	962	586	E
Transporte de calhidra	2.8096E-07	tonkm	963	599	E
Cemento gris	2.7355E-09	ton	964	587	E
Transporte de cemento gris	2.0129E-07	tonkm	965	600	E

Fuente: elaboración propia

Tabla 115. Resultados completos del ICV de la sulfitación del jugo					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Jugo mezclado de "Tanque de jugo mezclado"	8.9790E-04	ton	966	605	E
Azufre	5.7000E-05	ton	967	606	E
Transporte de azufre	5.0741E-05	tonkm	968	608	E
Emisión de azufre	5.7000E-05	ton	969	609	S
Jugo sulfitado	8.9796E-04	ton	970	607	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 116. Resultados completos del ICV para el tanque colchón					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Jugo sulfitado	8.9796E-04	Ton	971	610	E
Jugo filtrado	1.3468E-04	Ton	972	611	E
Jugo sulfitado y filtrado	1.0326E-03	ton	973	612	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 117. Resultados completos del ICV para la preparación de hidróxido de calcio					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Óxido de calcio	5.6080E-07	ton	974	613	E
Transporte de óxido de calcio	1.9213E-04	tonkm	975	616	E
Agua	5.3137E-07	ton	976	614	E
Energía eléctrica (tanque de cal)	6.6931E-05	kWh	977	615	E
Hidróxido de calcio	1.0922E-06	ton	978	612	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 118. Resultados completos del ICV para el tanque de alcalización					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Jugo sulfitado y filtrado	1.0326E-03	ton	979	618	E
Hidróxido de calcio	1.0922E-06	ton	980	619	E
Jugo alcalizado	1.0337E-03	ton	981	621	S
Energía eléctrica (bomba de lechada de cal)	2.0122E-04	kWh	982	620	E
Energía eléctrica (agitador de jugo)	4.0159E-05	kWh	983	620	E

Tabla 119. Resultados completos del ICV para el calentador primario					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Vapor para calentamiento primario	8.4962E-02	MJ	984	623	E
Jugo alcalizado	1.0337E-03	ton	985	622	E
Jugo alcalizado de salida	1.0337E-03	ton	986	624	S
Vapor condensado de calentador primario	3.8242E-05	ton	987	625	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 120. Resultados completos del ICV para el calentador secundario					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Vapor para calentamiento secundario	1.1895E-01	MJ	988	627	E
Jugo alcalizado 2	1.0337E-03	ton	989	626	E
Jugo alcalizado de salida 2	1.0337E-03	ton	990	628	S
Vapor condensado de calentador secundario	5.3538E-05	ton	991	629	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 121. Resultados completos del ICV para el calentador terciario					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Vapor para calentamiento final	5.0977E-02	Mj	992	631	E
Jugo alcalizado 3	1.0337E-03	ton	993	630	E
Jugo alcalizado de salida 3	1.0337E-03	ton	994	632	S
Vapor condensado de calentador final	2.2945E-05	ton	995	633	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 122. Resultados completos del ICV para la preparación del floculante					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Floculante	4.0975E-09	ton	996	634	E
Transporte de floculante	3.9807E-06	tonkm	997	637	E
Agua	4.8601E-07	ton	998	635	E
Energía eléctrica (agitador de floculante)	4.0159E-05	kWh	999	636	E
Solución de floculante	4.9011E-07	ton	1000	638	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 123. Resultados completos del ICV para la floculación					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Jugo alcalizado de calentador final	1.0337E-03	ton	1001	638	E
Solución de floculante	4.9011E-07	ton	1002	640	E
Jugo alcalizado con floculante	1.0342E-03	ton	1003	639	S

Tabla 124. Resultados completos del ICV para la cámara de clarificación					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Jugo floculado	1.0342E-03	ton	1004	642	E
Jugo clarificado	8.7794E-04	ton	1005	645	S
Lodos	1.5629E-04	ton	1006	644	S
Energía eléctrica (movimiento del clarificador)	6.6931E-05	kWh	1007	643	E
Energía eléctrica (bomba de liquidación)	3.3466E-04	kWh	1008	643	E

Fuente: elaboración propia

Tabla 125. Resultado completos del ICV del mezclador de lodos					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Lodos	1.5629E-04	ton	1009	646	E
Bagacillo	1.4546E-06	ton	1010	647	E
Lodo con bagacillo	1.5774E-04	ton	1011	649	S
Energía eléctrica (ventilador de bagacillo)	2.0300E-04	kWh	1012	648	E

Tabla 125. Resultado completos del ICV del mezclador de lodos					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Energía eléctrica (mezclador)	1.0040E-04	kWh	1013	648	E

Fuente: elaboración propia

Tabla 126. Resultados completos del ICV para la filtración de lodos					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Lodo con bagacillo	1.5774E-04	ton	1014	650	E
Agua	1.1869E-06	ton	1015	651	E
Energía eléctrica (bomba de vacío)	7.1153E-04	kWh	1016	652	E
Energía eléctrica (movimiento de charolas)	2.4541E-05	kWh	1017	652	E
Energía eléctrica (movimiento de filtros)	4.2179E-05	kWh	1018	652	E
Energía eléctrica (bomba de cachaza)	3.3466E-04	kWh	1019	652	E
Jugo filtrado	1.3468E-04	ton	1020	653	S
Cachaza	2.4243E-05	ton	1021	654	S
Cachaza - materia orgánica	1.6757E-05	ton	1022	655	S
Cachaza - nitrógeno	5.4790E-06	ton	1023	656	S
Cachaza - fósforo	5.5759E-07	ton	1024	657	S
Cachaza - potasio	3.8789E-07	ton	1025	658	S
Cachaza - calcio	1.4546E-07	ton	1026	659	S
Cachaza - magnesio	6.5457E-07	ton	1027	660	S
Cachaza - azufre	1.9395E-07	ton	1028	661	S

Tabla 127. Resultados completos del ICV para los servicios generales en clarificación					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Gas LP	5.1674E-10	ton	1029	662	E
Transporte de Gas LP	3.5035E-07	tonkm	1030	663	E

Fuente: elaboración propia

Tabla 128. Resultados completos del ICV para el precalentador uno					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Jugo clarificado	8.7794E-04	ton	1031	664	E
Vapor de precalentamiento	1.2083E+00	Mj	1032	665	E
Motor de bomba de jugo claro	5.9352E-04	kWh	1033	666	E
Energía requerida	1.1784E-01	Mj	1034	667	E
Vapor condensado	4.3559E-05	ton	1035	668	S
Energía perdida a alrededores	2.3569E-03	Mj	1036	669	E
Energía disponible para otros procesos	1.0881E+00	Mj	1037	670	S
Jugo precalentado I	8.7794E-04	ton	1038	671	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 129. Resultados completos del ICV del precalentador dos					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Jugo precalentado 1	8.7794E-04	ton	1039	672	E
Vapor de precalentamiento 2	1.0881E+00	MJ	1040	673	E
Energía requerida	8.4174E-02	MJ	1041	674	E
Pérdidas a alrededores	1.6835E-03	MJ	1042	675	S
Energía disponible para otros procesos	1.0022E+00	MJ	1043	676	S
Vapor condensado 2	3.1114E-05	ton	1044	677	S
Jugo precalentado 2	8.7794E-04	ton	1045	678	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 130. Resultados completos del ICV para el evaporador uno					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Jugo precalentado 2	8.7794E-04	ton	1046	679	E
Sosa caustica al 50%	2.5948E-08	ton	1047	680	E
Transporte de sosa al 50%	4.9754E-05	tonkm	1048	681	E
Vapor de entrada	1.0022E+00	MJ	1049	682	E
Vapor consumido	6.8878E-01	MJ	1050	683	E
Vapor generado para calentadores	2.9969E-01	MJ	1051	686	S
Energía perdida a alrededores	1.3776E-02	MJ	1052	684	S
Vapor condensado de vapor directo de calderas	3.1687E-04	ton	1053	685	S
Jugo concentrado 1	5.7944E-04	ton	1054	687	S

Tabla 131. Resultados completos del ICV para el evaporador dos					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Jugo concentrado 1	5.7944E-04	ton	1055	688	E
Sosa caustica al 50%	2.5948E-08	ton	1056	689	E
Transporte de sosa al 50%	4.9754E-05	tonkm	1057	690	E
Vapor de entrada	5.1019E-01	MJ	1058	691	E
Vapor consumido	3.2977E-01	MJ	1059	692	E
Vapor generado para calentadores	1.7383E-01	MJ	1060	695	S
Energía perdida a alrededores	6.5955E-03	MJ	1061	694	S
Vapor condensado de vapor de jugo precalentado 1	2.9850E-04	ton	1062	693	S
Jugo concentrado 2	4.2606E-04	ton	1063	696	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 132. Resultados completos del ICV para el evaporador tres					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Jugo concentrado 2	4.2606E-04	ton	1064	697	E
Sosa caustica al 50%	2.5948E-08	ton	1065	698	E
Transporte de sosa al 50%	4.9754E-05	tonkm	1066	699	E
Vapor de entrada	3.3862E-01	MJ	1067	700	E
Energía para vaso 4	1.8482E-01	MJ	1068	704	S
Energía perdida a alrededores	1.5380E-01	MJ	1069	703	S
Energía requerida	3.6187E-02	MJ	1070	701	E
Vapor condensado de vapor de jugo concentrado 2	1.5338E-04	MJ	1071	702	S
Jugo concentrado 3	3.4490E-04	ton	1072	705	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 133. Resultados completos del ICV para el evaporador cuatro					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Jugo concentrado 3	3.4490E-04	ton	1073	706	E
Sosa caustica al 50%	2.5948E-08	ton	1074	707	E
Transporte de sosa al 50%	4.9754E-05	tonkm	1075	708	E
Vapor de entrada	1.8182E-01	MJ	1076	709	E
Energía requerida	3.2057E-02	MJ	1077	710	E
Vapor para vaso 5	1.3893E-01	MJ	1078	713	S
Energía perdida a alrededores	4.2895E-02	MJ	1079	712	S
Vapor condensado de vapor de jugo concentrado 3	8.1154E-05	ton	1080	711	S
Jugo concentrado 4	2.8404E-04	ton	1081	714	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 134. Resultados completos del ICV para el evaporador cinco					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Jugo concentrado 4	2.8404E-04	ton	1082	715	E
Sosa caustica al 50%	2.5948E-08	ton	1083	716	E
Transporte de sosa al 50%	4.9754E-05	tonkm	1084	717	E
Vapor de entrada	1.3705E-01	MJ	1085	718	E
Energía perdida a alrededores	1.3705E-01	MJ	1086	721	S
Energía requerida	4.3105E-02	MJ	1087	719	E
Motor de bomba de meladura	2.6829E-04	kWh	1088	723	E
Motor de bomba de vacío	6.5209E-04	kWh	1089	723	E
Motor de bomba de agua	1.7230E-04	kWh	1090	723	E
Vapor condensado de vapor de jugo concentrado 4	6.0865E-05	MJ	1091	720	S
Meladura	2.4143E-04	ton	1092	722	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 135. Resultados completos del ICV para servicios generales					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Gas LP	4.1477E-07	ton	1093	724	E
Transporte de gas LP - evaporación	2.8121E-07	tonkm	1094	728	E
Placa de acero al carbón	4.9801E-10	ton	1095	725	E
Transporte de placa de acero al carbón	1.4619E-06	tonkm	1096	729	E
Oxígeno	1.4329E-09	ton	1097	726	E
Transporte de oxígeno	2.1460E-05	tonkm	1098	730	E
Materiales de acero	1.8696E-10	ton	1099	727	E
Transporte de materiales de acero	1.9589E-08	tonkm	1100	731	E

Fuente: elaboración propia

Tabla 136. Resultados completos del ICV del generador ELIN					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Vapor generado en caldera	2.9219E-01	Mj	1101	732	E
Agua de enfriamiento	1.3603E-01	ton	1102	733	E
Agua de enfriamiento	1.3603E-01	ton	1103	734	S
Vapor de escape	2.5625E-01	Mj	1104	735	S
Energía eléctrica	5.5601E-03	kWh	1105	736	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 137. Resultados completos del ICV del generador General Electric					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Vapor generado en caldera	2.8624E-01	Mj	1106	737	E
Agua de enfriamiento	1.3327E-01	ton	1107	738	E
Agua de enfriamiento	1.3327E-01	ton	1108	739	S
Vapor de escape	2.4528E-01	Mj	1109	740	S
Energía eléctrica	5.4470E-03	kWh	1110	741	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 138. Resultados completos del ICV de los servicios generales en planta de fuerza					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Placa de acero	6.3170E-09	ton	1111	742	E
Transporte de placa de acero	2.2253E-06	tonkm	1112	750	E
Aceite turbinas I5	1.6021E-09	ton	1113	743	E
Transporte de aceite turbinas I5	6.7942E-07	tonkm	1114	751	E
Cemento aislante monolítico	1.3384E-09	ton	1115	744	E
Transporte de cemento aislante	3.0059E-05	tonkm	1116	752	E
Cable conductor de cobre	8.1792E-02	ton	1117	745	E
Transporte de cable conductor de cobre	1.2297E-06	tonkm	1118	753	E

Tabla 138. Resultados completos del ICV de los servicios generales en planta de fuerza					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Solvente dielectron ss-25	2.0237E-01	ton	1119	746	E
Transporte de solvente	7.0378E-06	tonkm	1120	754	E
Oxígeno	2.0522E-10	ton	1121	747	E
Transporte oxígeno	3.0734E-06	tonkm	1122	755	E
Electrodo 508 de 3/32"	6.6433E-12	ton	1123	748	E
Transporte de electrodo 508 de 3/32"	3.9860E-11	tonkm	1124	756	E
Emisión de Cr	2.3584E-12	g	1125	758	S
Emisión de Mn	2.8566E-13	g	1126	760	S
Emisión de Ni	1.0364E-12	g	1127	761	S
Electrodo 6010 de 1/8"	3.5171E-11	ton	1128	748	E
Transporte de electrodo 6010 de 1/8"	1.9020E-07	tonkm	1129	756	E
Emisión de Cr	1.4068E-13	g	1130	758	S
Emisión de Co	3.5171E-14	g	1131	759	S
Emisión de Mn	3.1126E-11	g	1132	760	S
Emisión de Ni	2.1102E-13	g	1133	761	S
Electrodo 6010 de 5/32"	1.1724E-11	ton	1134	748	E
Transporte de electrodo 6010 de 5/32"	5.3647E-08	tonkm	1135	756	E
Emisión de Cr	4.6894E-14	g	1136	758	S
Emisión de Co	1.1724E-14	g	1137	759	S
Emisión de Mn	1.0375E-11	g	1138	760	S
Emisión de Ni	7.0341E-14	g	1139	761	S
Electrodo 7018 de 1/8"	1.9539E-11	ton	1140	748	E
Transporte de electrodo 7018 de 1/8"	2.0321E-07	tonkm	1141	756	E
Emisión de Cr	1.9539E-13	g	1142	758	S
Emisión de Mn	1.8797E-11	g	1143	760	S
Electrodo 7018 de 3/32"	9.7696E-12	ton	1144	748	E
Transporte de electrodos 7018 de 3/32"	1.6257E-08	tonkm	1145	756	E
Emisión de Cr	9.7696E-14	g	1146	758	S
Emisión de Mn	9.3984E-12	g	1147	760	S
Insumos de acero	6.9872E-11	ton	1148	749	E
Transporte de insumos de acero	1.9208E-15	tonkm	1149	757	E

Fuente: elaboración propia

Tabla 139. Resultados completos del ICV para los evaporadores 4 - C					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Miel de "B"	5.6136E-05	ton	1150	762	E
Miel de "A"	1.6841E-05	ton	1151	763	E
Vapor de evaporación	9.9200E-02	MJ	1152	764	E

Tabla 139. Resultados completos del ICV para los evaporadores 4 - C					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Energía eléctrica - cristalizadores	1.3951E-04	kWh	1153	765	E
Energía eléctrica - bomba de vacío	6.5209E-04	kWh	1154	765	E
Pie de temple "C"	7.2977E-05	ton	1155	766	S
Agua evaporada	3.8152E-05	ton	1156	767	S
Agua condensada	3.8152E-05	ton	1157	768	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 140. Resultados completos del ICV para los evaporadores 5 - C					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Pie de temple "C"	3.6489E-05	ton	1158	769	E
Miel de "B"	3.6489E-05	ton	1159	770	E
Vapor de evaporación	6.1628E-02	Mj	1160	771	E
Energía eléctrica - semillero C	3.4098E-04	kWh	1161	772	E
Masa de "C"	7.2977E-05	ton	1162	765	S
Agua evaporada	2.3702E-05	ton	1163	773	S
Agua condensada	2.3702E-05	ton	1164	774	S

Tabla 141. Resultados completos del ICV para los evaporadores 1 - B					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Semilla "C"	3.0333E-05	ton	1165	776	E
Miel de "A"	6.8167E-05	ton	1166	777	E
Lavado	1.1466E-05	ton	1167	778	E
Vapor de evaporación	9.7501E-02	Mj	1168	779	E
Energía eléctrica - semillero B	5.5804E-05	kWh	1169	780	E
Energía eléctrica - bomba de vacío	6.5209E-04	kWh	1170	780	E
Masa de "B"	1.0997E-04	ton	1171	781	S
Agua evaporada	3.7499E-05	ton	1172	782	S
Agua condensada	3.7499E-05	ton	1173	783	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 142. Resultados completos del ICV para los servicios en general					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Semilla "B"	5.8382E-05	ton	1174	784	E
Meladura	1.4099E-04	ton	1175	785	E
Vapor de evaporación	2.6126E-01	Mj	1176	786	E
Energía eléctrica - bomba de vacío	6.5209E-04	kWh	1177	787	E
Masa de "A"	1.9937E-04	ton	1178	788	S
Agua evaporada	1.0048E-04	ton	1179	789	S

Tabla 142. Resultados completos del ICV para los servicios en general					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Agua condensada	1.0048E-04	ton	1180	790	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 143. Resultados completos del ICV para los servicios en general					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Cincho de plástico	4.9879E-14	ton	1181	791	E
Transporte de cincho de plástico	2.2803E-05	tonkm	1182	798	E
Placa de acero antiderrapante	1.0385E-08	ton	1183	792	E
Transporte de placa de acero antiderrapante	6.7849E-07	tonkm	1184	799	E
Placa de acero al carbón	8.3483E-10	ton	1185	792	E
Transporte de placa de acero	2.9408E-07	tonkm	1186	799	E
Placa de acero	7.8489E-10	ton	1187	792	E
Transporte de placa de acero	1.7272E-06	tonkm	1188	799	E
Placa de acero	7.2295E-10	ton	1189	792	E
Transporte de placa de acero	1.9713E-06	tonkm	1190	799	E
Arandela	6.5652E-12	ton	1191	793	E
Transporte de arandelas	1.9050E-06	tonkm	1192	800	E
Tornillo grado	3.8248E-09	ton	1193	794	E
Transporte de tornillos	4.3627E-06	tonkm	1194	801	E
Gas LP	1.8116E-10	ton	1195	795	E
Transporte de Gas	1.2283E-07	tonkm	1196	802	E
Oxígeno	1.0605E-09	ton	1197	796	E
Transporte de oxígeno	1.5881E-05	tonkm	1198	803	E
Electrodo 508 de 1/8"	9.7696E-12	ton	1199	797	E
Transporte de electrodo 508 de 1/8"	2.3056E-09	tonkm	1200	804	E
Emisión de Cr	3.4682E-12	g	1201	805	S
Emisión de Mn	4.2009E-13	g	1202	807	S
Emisión de Ni	1.5241E-12	g	1203	808	S
Electrodo 6010 de 1/8"	9.8673E-11	ton	1204	797	E
Transporte de electrodo 6010 de 1/8"	5.3362E-07	tonkm	1205	804	E
Emisión de Cr	3.9469E-13	g	1206	805	S
Emisión de Co	9.8673E-14	g	1207	806	S
Emisión de Mn	8.7326E-11	g	1208	807	S
Emisión de Ni	5.9204E-13	g	1209	808	S
Electrodo 6010 de 5/32"	6.6433E-11	ton	1210	797	E
Transporte de electrodo 6010 de 5/32"	3.0400E-07	tonkm	1211	804	E
Emisión de Cr	2.6573E-13	g	1212	805	S
Emisión de Co	6.6433E-14	g	1213	806	S

Tabla 143. Resultados completos del ICV para los servicios en general					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Emisión de Mn	5.8794E-11	g	1214	807	S
Emisión de Ni	3.9860E-13	g	1215	808	S
Electrodo 7018 de 1/8"	1.3677e-10	ton	1216	797	E
Transporte de electrodo 7018 de 1/8"	1.4225E-06	tonkm	1217	804	E
Emisión de Cr	1.3677E-12	g	1218	805	S
Emisión de Mn	1.3158E-10	g	1219	807	S
Electrodo 7018 de 5/32"	2.7355e-11	ton	1220	797	E
Transporte de electrodo 7018 de 5/32"	4.5519e-08	tonkm	1221	804	E
Emisión de Cr	2.7355E-13	g	1222	805	S
Emisión de Mn	2.6315E-11	g	1223	807	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 144. Resultados completos del ICV para las centrífugas C					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Masa de "C"	7.2977E-05	ton	1224	809	E
Semilla "C"	3.0333E-05	ton	1225	810	S
Melaza	4.2645E-05	ton	1226	822	S
Motor de centrífuga No.1 de "C"	4.8828E-04	kWh	1227	811	E
Motor de centrífuga No. 2 de "C", SILVER	9.1553E-04	kWh	1228	811	E
Motor del mezclador de masa de "C" N° 1	2.4414E-04	kWh	1229	811	E
Motor del mezclador de masa de "C" N° 2	2.6829E-04	kWh	1230	811	E
Motor del sinfín de "C" No. 1	2.0122E-04	kWh	1231	811	E
Motor del sinfín de "C" No. 2	1.9817E-04	kWh	1232	811	E
Motor del Mingler de "C"	1.2207E-05	kWh	1233	811	E
Motor de bomba No. 1 de magma "C"	2.0926E-04	kWh	1234	811	E
Electrodo 6010 de 1/8"	5.8618E-12	Ton	1235	812	E
Transporte de electrodo 6010 de 1/8"	3.4139E-08	Tonkm	1236	817	E
Emisión de cr	2.3447E-14	g	1237	823	S
Emisión de co	5.8618E-15	g	1238	824	S
Emisión de mn	5.1877E-12	g	1239	825	S
Emisión de ni	3.5171E-14	g	1240	826	S
Electrodo 6013 de 3/32"	7.8157E-12	Ton	1241	812	E
Transporte de electrodo 6013 de 3/32"	8.1283E-08	Tonkm	1242	817	E
Emisión de Cr	1.8758E-13	g	1243	823	S
Emisión de Mn	8.0502E-12	g	1244	825	S
Electrodo 7018 de 1/8"	3.9078E-12	Ton	1245	812	E
Transporte de electrodo 7018 de 1/8"	4.0642E-08	Tonkm	1246	817	E
Emisión de Cr	3.9078E-14	g	1247	823	S

Tabla 144. Resultados completos del ICV para las centrifugas C					
Emisión de Mn	3.7594E-12	g	1248	825	S
Aceite mobil 600	1.4225E-11	Ton	1249	813	E
Transporte de aceite mobil 600	4.8116E-08	Tonkm	1250	818	E
Arandela acero	3.5171E-13	Ton	1251	814	E
Transporte de arandela acero	4.3564E-07	Tonkm	1252	819	E
Tornillo acero	7.4491E-13	Ton	1253	815	E
Transporte de tornillo acero	1.7685E-06	Tonkm	1254	820	E
Insumos de acero	5.9790E-14	ton	1255	816	E
Transporte de insumos de acero	2.0016E-07	tonkm	1256	821	E

Fuente: elaboración propia

Tabla 145. Resultados completos del ICV para las centrifugas B					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Masa de "B"	1.0997E-04	ton	1257	827	E
Semilla "B"	5.8382E-05	ton	1258	828	S
Miel de "B"	5.1584E-05	ton	1259	830	S
Motor de centrifuga No. 1 de "B"	5.2447E-04	kWh	1260	829	E
Motor de centrifuga No. 2 de "B"	6.1036E-04	kWh	1261	829	E
Motor de centrifuga No. 3 de "B"	6.1036E-04	kWh	1262	829	E
Motor del mezclador de masa de "B"	7.9612E-05	kWh	1263	829	E
Motor del sinfín de "B" No.1	3.2815E-04	kWh	1264	829	E
Motor de bomba No. 1 de magma "B"	2.6770E-04	kWh	1265	829	E
Motor de bomba No. 2 miel de "B"	2.7278E-04	kWh	1266	829	E

Tabla 146. Resultados completos del ICV para las centrifugas A					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Masa de "A"	1.9937E-04	ton	1267	831	E
Azúcar húmeda	1.0548E-04	ton	1268	841	S
Miel de "A"	9.3893E-05	ton	1269	842	S
Motor de centrifuga No. 1 de "A"	1.5259E-03	kWh	1270	832	E
Motor del ventilador de centrifuga "A" 1	2.9297E-05	kWh	1271	832	E
Motor de centrifuga No. 3 de "A"	1.5259E-03	kWh	1272	832	E
Motor del ventilador de centrifuga "A" 3	2.9297E-05	kWh	1273	832	E
Motor de centrifuga No. 4 de "A"	1.5259E-03	kWh	1274	832	E
Motor del ventilador de centrifuga "A" 4	4.1853E-05	kWh	1275	832	E
Motor de mezclador de masa de "A"	2.6829E-04	kWh	1276	832	E
Motor del sinfín de "a"	3.0518E-04	kWh	1277	832	E
Motor de bomba no. 2 miel de "a"	1.3951E-04	kWh	1278	832	E
Electrodo 6010 de 1/8"	7.8157E-12	ton	1279	833	E

Tabla 146. Resultados completos del ICV para las centrifugas A					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Transporte de electrodo 6010 de 1/8"	4.5519E-08	tonkm	1280	837	E
Emisión de Cr	3.1263E-14	g	1281	843	S
Emisión de Co	7.8157E-15	g	1282	844	S
Emisión de Mn	6.9169E-12	g	1283	845	S
Emisión de Ni	4.6894E-14	g	1284	846	S
Oxígeno	2.6526E-11	ton	1285	834	E
Transporte de oxígeno	3.9725E-07	tonkm	1286	838	E
Arandela acero	3.5171E-13	ton	1287	835	E
Transporte de arandela	1.1774E-06	tonkm	1288	839	E
Tornillo acero	1.2943E-12	ton	1289	836	E
Transporte de tornillo	3.0727E-06	tonkm	1290	840	E
Insumos de acero	3.8688E-14	ton	1291	836	E
Transporte de insumos de acero	1.2951E-07	tonkm	1292	840	E

Fuente: elaboración propia

Tabla 147. Resultados completos del ICV los servicios generales					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Placa de acero	2.7644E-10	ton	1293	847	E
Transporte de placa de acero	8.1150E-07	tonkm	1294	856	E
Cincho de plástico	3.4189E-09	ton	1295	847	E
Transporte de cincho de plástico	8.3422E-07	tonkm	1296	857	E
Electrodo 6010 de 1/8"	1.5241E-10	ton	1297	849	E
Transporte de electrodo 6010 de 1/8"	8.8761E-07	tonkm	1298	858	E
Emisión de Cr	6.0962E-13	g	1299	865	S
Emisión de Co	1.5241E-13	g	1300	866	S
Emisión de Mn	1.3488E-10	g	1301	867	S
Emisión de Ni	9.1444E-13	g	1302	868	S
Electrodo 6010 de 5/32"	2.3447E-11	ton	1303	849	E
Transporte de electrodo 6010 de 5/32"	8.3003E-09	tonkm	1304	858	E
Emisión de Cr	9.3788E-14	g	1305	865	S
Emisión de Co	2.3447E-14	g	1306	866	S
Emisión de Mn	2.0751E-11	g	1307	867	S
Emisión de Ni	1.4068E-13	g	1308	868	S
Electrodo 6013 de 3/32"	1.8562E-11	ton	1309	849	E
Transporte de electrodo 6013 de 3/32"	1.9305E-07	tonkm	1310	858	E
Emisión de Cr	4.4549E-13	g	1311	865	S
Emisión de Mn	1.9119E-11	g	1312	867	S
Electrodo 7018 de 1/8"	2.2275E-10	ton	1313	849	E

Tabla 147. Resultados completos del ICV los servicios generales					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Transporte de electrodo 7018 de 1/8"	4.0642E-08	tonkm	1314	858	E
Emisión de Cr	2.2275E-12	g	1315	865	S
Emisión de Mn	2.1428E-10	g	1316	867	S
Electrodo 7018 de 5/32"	2.0516E-11	ton	1317	849	E
Transporte de electrodo 7018 de 5/32"	3.4139E-08	tonkm	1318	858	E
Emisión de Cr	2.0516E-13	g	1319	865	S
Emisión de Mn	1.9737E-11	g	1320	867	S
Electrodo 508 de 3/32"	2.6378E-11	ton	1321	849	E
Transporte de electrodo 508 de 3/32"	9.3378E-09	tonkm	1322	858	E
Emisión de Cr	9.3642E-12	g	1323	865	S
Emisión de Mn	1.1343E-12	g	1324	867	S
Emisión de Ni	4.1150E-12	g	1325	868	S
Electrodo 508 de 1/8"	2.7941E-11	ton	1326	849	E
Transporte de electrodo 508 de 1/8"	6.5941E-09	tonkm	1327	858	E
Emisión de Cr	9.9191E-12	g	1328	865	S
Emisión de Mn	1.2015E-12	g	1329	867	S
Emisión de Ni	4.3588E-12	g	1330	868	S
Aceite mobil 600	3.5561E-11	ton	1331	850	E
Transporte de aceite mobil 600	1.2029E-07	tonkm	1332	859	E
Aceite grado alimenticio	3.2855E-11	ton	1333	850	E
Transporte de aceite grado alimenticio	2.8932E-06	tonkm	1334	859	E
Oxígeno	1.2230E-09	ton	1335	851	E
Transporte de oxígeno	1.8315E-05	tonkm	1336	860	E
Gas LP	2.4109E-10	ton	1337	852	E
Transporte de gas LP	1.6346E-07	tonkm	1338	861	E
Arandela acero maquina plana de 5/8"	5.1683E-12	ton	1339	853	E
Transporte de arandela acero	1.7302E-05	tonkm	1340	862	E
Tornillo acero	3.4172E-11	ton	1341	854	E
Transporte de tornillo acero	1.3359E-05	tonkm	1342	863	E
Acero cold rolled redondo	1.3482E-10	ton	1343	855	E
Transporte de acero cold rolled redondo	5.6488E-07	tonkm	1344	864	E
Materiales de acero	1.0780E-11	ton	1345	855	E
Transporte de materiales de acero	2.0016E-05	tonkm	1346	864	E

Fuente: elaboración propia

Tabla 148. Resultados completos del ICV para el elevador de azúcar					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Azúcar húmeda	1.0548E-01	ton	1347	869	E

Tabla 148. Resultados completos del ICV para el elevador de azúcar					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Motor de elevador azúcar húmeda	2.0122E-04	kWh	1348	870	E
Azúcar húmeda elevada	1.0548E-01	ton	1349	871	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 149. Resultados completos del ICV del sinfín					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Azúcar húmeda	1.0548E-01	ton	1350	872	E
Motor del sinfín a tolva azúcar húmeda	1.3639E-04	kWh	1351	873	E
Azúcar húmeda elevada	1.0548E-01	ton	1352	874	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 150. Resultados completos del ICV del secador					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Azúcar húmeda	1.0548E-01	ton	1353	875	E
Motor del sinfín alimentador secador	1.3312E-04	kWh	1354	876	E
Motor de movimiento del secador	3.0518E-04	kWh	1355	876	E
Motor del rotoclone	4.8828E-04	kWh	1356	876	E
Motor del ventilador auxiliar	1.8311E-04	kWh	1357	876	E
Agua evaporada	5.4959E-03	ton	1358	880	S
Aire caliente	3.1692E-02	Mj	1359	877	E
Pérdida de energía	3.1692E-03	Mj	1360	878	S
Azúcar seca	1.0000E-06	ton	1361	881	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 151. Resultados completos del ICV del elevador de azúcar seca					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Azúcar seca	1.0000E-06	ton	1362	882	E
Motor de elevador de azúcar seca	3.2815E-04	kWh	1363	883	E
Azúcar seca	1.0000E-06	ton	1364	884	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 152. Resultados completos del ICV de la zaranda					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Azúcar seca	1.0000E-06	ton	1365	885	E
Motor movimiento criba	3.0518E-05	kWh	1366	886	E
Azúcar seca	1.0000E-06	ton	1367	887	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 153. Resultados completos del ICV de la báscula					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Azúcar seca	1.0000E-06	ton	1368	888	E
Motor del transp. de la Bascula pesadora	3.6621E-05	kWh	1369	889	E
Azúcar seca	1.0000E-06	ton	1370	890	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 154. Resultados completos del ICV de la cosedora					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Azúcar seca	1.0000E-06	ton	1371	888	E
Motor de Banda Maquina Cosedora	1.5650E-05	kWh	1372	889	E
Motor del transportador N° 1	3.6621E-05	kWh	1373	889	E
Motor del transportador N° 2	2.9297E-05	kWh	1374	889	E
Motor del transportador N° 3	2.9297E-05	kWh	1375	889	E
Motor del transportador N° 4	3.6621E-05	kWh	1376	889	E
Motor de bomba de aceite del remontador	2.9297E-05	kWh	1377	889	E
Motor transp.de sacos pequeño	2.1230E-05	kWh	1378	889	E
Azúcar seca almacenada	1.0000E-06	ton	1379	890	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 155. Resultados completos del ICV de los servicios en secado y empackado					
Insumo	Cantidad	Unidad	NC	NE	E/S
Oxígeno	1.5915E-10	ton	1380	897	E
Transporte de oxígeno	2.3835E-06	tonkm	1381	898	E
Gas LP	5.8622E-08	ton	1382	899	E
Transporte de Gas LP	3.9746E-08	tonkm	1383	900	E

Fuente: elaboración propia

ANEXO C

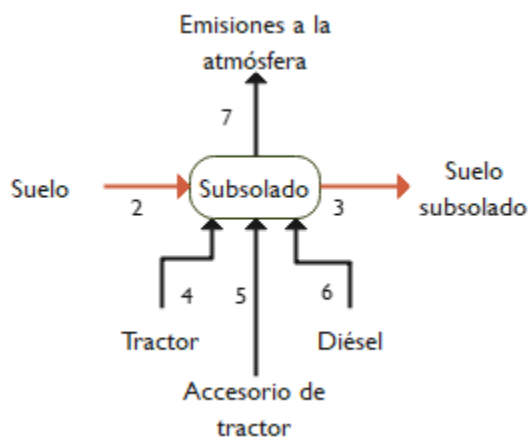


Figura 47. Flujos de entrada y salida en la operación de subsolado
Fuente: elaboración propia

La cantidad de suelo necesario para la producción de azúcar relacionada con la unidad funcional se muestra en la Ecuación 2. En ella se incluye la cantidad total de hectáreas cultivadas en el ciclo de la zafra 2021/22 y la cantidad total de caña cosechada, multiplicada por un factor de corrección que relaciona la materia extraña que llegó a la fábrica. Dividido por la unidad funcional representada por 100 gramos de azúcar.

$$\frac{\text{suelo necesario (ha)}}{\text{producción total de azúcar (100 g)}} = \frac{\text{hectáreas cultivadas (ha)}}{\text{caña cosechada (ton)}} * \frac{\text{caña cosechada} * \% \text{ materia extraña (ton)}}{\text{producción total de azúcar (100 g)}}$$

Ecuación 2

La misma cantidad de suelo utilizado para la cosecha es la cantidad de suelo que sale hacia la siguiente operación unitaria. A partir de la Ecuación 3 se utilizará el término de entrada o salida, para cantidades equivalentes y el término de producción total de azúcar (100 g) a producción de azúcar (g).

$$\frac{\text{suelo utilizado entrada (ha)}}{\text{producción total de azúcar (100 g)}} = \frac{\text{suelo subsolado de salida}}{\text{producción de azúcar}}$$

Ecuación 3

La cantidad de tractor e implementos amortizados a la cantidad de producción de azúcar para llevar a cabo las labores en campo se presentan en la Ecuación 4 y Ecuación 5 respectivamente.

$$\frac{\text{Cantidad de tractor (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{cantidad de tractor (kg)}}{\text{hectáreas de cultivo (ha)}} * \frac{\frac{\text{horas de trabajo (h)} * \text{zafra (año)} * \text{días de trabajo (día)}}{\text{días de trabajo (día)}} * \frac{\text{zafra (año)}}{\text{zafra (año)}}}{\frac{\text{caña cosechada (ton)}}{\text{hectáreas de cultivo (ha)}}} * \frac{\text{caña cosechada} * \% \text{ materia extraña (ton)}}{\text{producción total de azúcar (100 g)}}$$

Ecuación 4

$$\frac{\text{Cantidad de accesorio (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{cantidad de implemento (kg)}}{\text{hectáreas de cultivo (ha)}} * \frac{\frac{\text{horas de trabajo (h)} * \text{zafra (año)} * \text{días de trabajo (día)}}{\text{días de trabajo (día)}} * \frac{\text{zafra (año)}}{\text{zafra (año)}}}{\frac{\text{caña cosechada (ton)}}{\text{hectáreas de cultivo (ha)}}} * \frac{\text{caña cosechada} * \% \text{ materia extraña (ton)}}{\text{producción total de azúcar (100 g)}}$$

Ecuación 5

La cantidad de diésel contabilizado para el uso del tractor durante las horas de trabajo se muestran en la Ecuación 6.

$$\frac{\text{diésel (L)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{litros de diésel (L)}}{\text{días de trabajo (día)}} * \frac{\text{días de trabajo (día)}}{\text{zafra (año)}}}{\frac{\text{producción de azúcar (g)}}{\text{zafra (año)}}}$$

Ecuación 6

Las emisiones generadas por el consumo del diésel se contabilizaron con la Ecuación 7. Se multiplicó un factor de emisión por la cantidad de diésel utilizados para la operación del tractor, calculado en la Ecuación 6.

$$\frac{\text{emisión de dióxido de carbono (kg CO}_2\text{)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{2.61 \text{ kg CO}_2}{\text{L de diésel}} * \frac{\text{diésel (L)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 7

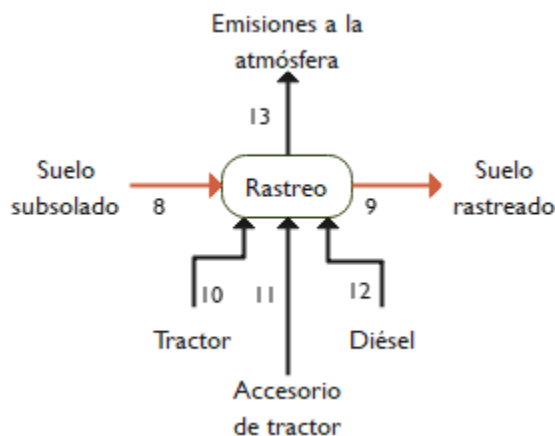


Figura 48. Flujos de entrada y salida en la operación de rastreo

Fuente: elaboración propia

La cantidad de suelo que se utilizó en el subsolado del terreno en la primera operación es la misma cantidad que la que se rastreará. La Ecuación 8 representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{suelo subsolado de salida (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{suelo subsolado de entrada (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 8

La misma cantidad de suelo rastreado es la misma cantidad de suelo que sale hacia la siguiente operación unitaria y se representa mediante la Ecuación 9.

$$\frac{\text{suelo rastreado de entrada (ha)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{suelo rastreado de salida (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 9

La cantidad de tractor e implementos amortizados a la cantidad de producción de azúcar para llevar a cabo las labores en campo se presentan en la Ecuación 10 y Ecuación 11 respectivamente.

$$\begin{aligned} & \frac{\text{Cantidad de tractor (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} \\ &= \frac{\text{cantidad de tractor (kg)}}{\text{hectáreas de cultivo (ha)}} * \frac{\frac{\text{horas de trabajo (h)} * \text{zafra (año)} * \text{días de trabajo (día)}}{\text{días de trabajo (día)} * \text{zafra (año)}}}{\frac{\text{horas de vida útil de tractor (h)}}{\text{hectáreas de cultivo (ha)}}} * \frac{\text{caña cosechada} * \% \text{ materia extraña (ton)}}{\text{producción total de azúcar (100 g)}} \end{aligned}$$

Ecuación 10

$$\begin{aligned} & \frac{\text{Cantidad de accesorio (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} \\ &= \frac{\text{cantidad de accesorio (kg)}}{\text{hectáreas de cultivo (ha)}} * \frac{\frac{\text{horas de trabajo (h)} * \text{zafra (año)} * \text{días de trabajo (día)}}{\text{días de trabajo (día)} * \text{zafra (año)}}}{\frac{\text{horas de vida útil de tractor (h)}}{\text{hectáreas de cultivo (ha)}}} * \frac{\text{caña cosechada} * \% \text{ materia extraña (ton)}}{\text{producción total de azúcar (100 g)}} \end{aligned}$$

Ecuación 11

La cantidad de diésel contabilizado para el uso del tractor durante las horas de trabajo se muestran en la Ecuación 12.

$$\frac{\text{diésel (L)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{litros de diésel (L)} * \text{días de trabajo (día)}}{\text{días de trabajo (día)} * \text{zafra (año)}}}{\frac{\text{producción de azúcar (g)}}{\text{zafra (año)}}}$$

Ecuación 12

Las emisiones generadas por el consumo del diésel se contabilizaron con la Ecuación 12. Se multiplicó un factor de emisión por la cantidad de diésel utilizados para la operación del tractor, calculado en la Ecuación 13.

$$\frac{\text{emisión de dióxido de carbono (kg CO}_2\text{)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{2.61 \text{ kg CO}_2}{\text{L de diésel}} * \frac{\text{diésel (L)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 13

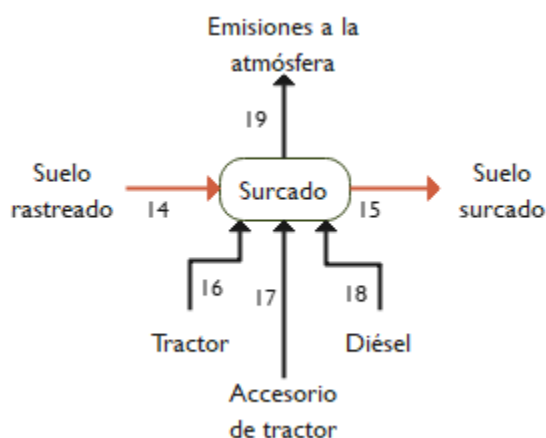


Figura 49. Flujos de entrada y salida durante el surgado del terreno

Fuente: elaboración propia

La cantidad de suelo que se utilizó en el rastreo del terreno en la segunda operación es la misma cantidad que la que se surcará. Por lo tanto, la Ecuación 14 representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{suelo rastreado de salida (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{suelo surgado de entrada (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 14

La cantidad de suelo surgado es la misma cantidad de suelo que sale hacia la siguiente operación unitaria y se representa mediante la Ecuación 15.

$$\frac{\text{suelo surgado de entrada (ha)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{suelo surgado de salida (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 15

La cantidad de tractor e implementos amortizados a la cantidad de producción de azúcar para llevar a cabo las labores en campo se presentan en la Ecuación 16 y Ecuación 17 respectivamente.

$$\frac{\text{Cantidad de tractor (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de tractor (kg)}}{\text{hectáreas de cultivo (ha)}} * \frac{\frac{\text{horas de trabajo (h)} * \text{zafra (año)} * \text{días de trabajo (día)}}{\text{días de trabajo (día)} * \text{zafra (año)}}}{\frac{\text{horas de vida útil de tractor (h)}}{\text{caña cosechada (ton)}}} * \frac{\text{caña cosechada} * \% \text{ materia extraña (ton)}}{\text{producción total de azúcar (100 g)}}$$

Ecuación 16

$$\frac{\text{Cantidad de accesorio (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de implemento (kg)}}{\text{hectáreas de cultivo (ha)}} * \frac{\frac{\text{horas de trabajo (h)} * \text{zafra (año)} * \text{días de trabajo (día)}}{\text{días de trabajo (día)} * \text{zafra (año)}}}{\frac{\text{horas de vida útil de tractor (h)}}{\text{caña cosechada (ton)}}} * \frac{\text{caña cosechada} * \% \text{ materia extraña (ton)}}{\text{producción total de azúcar (100 g)}}$$

Ecuación 17

La cantidad de diésel contabilizado para el uso del tractor durante las horas de trabajo se muestran en la Ecuación 18.

$$\frac{\text{diésel (L)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{litros de diésel (L)} * \text{días de trabajo (día)}}{\text{días de trabajo (día)} * \text{zafra (año)}}}{\frac{\text{producción de azúcar (g)}}{\text{zafra (año)}}}$$

Ecuación 18

Las emisiones generadas por el consumo del diésel se contabilizaron con la Ecuación 19. Se multiplicó un factor de emisión por la cantidad de diésel utilizados para la operación del tractor, calculado en la Ecuación 18.

$$\frac{\text{emisión de dióxido de carbono (kg CO}_2\text{)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{2.61 \text{ kg CO}_2}{\text{L de diésel}} * \frac{\text{diésel (L)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 19

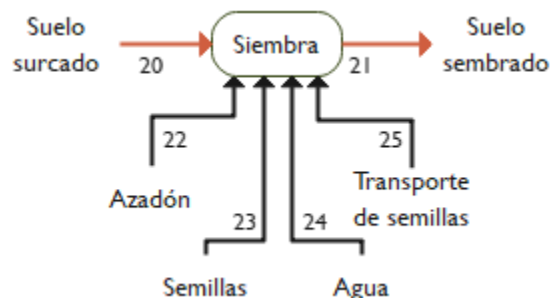


Figura 50. Flujos de entrada y salida durante la siembra
Fuente: elaboración propia

La cantidad de suelo que se utilizó en el rastreo del terreno en la segunda operación es la misma cantidad que la que se surcará. Por lo tanto, la Ecuación 20 representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{suelo rastreado de salida (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{suelo surcado de entrada (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 20

La cantidad de suelo surcado es la misma cantidad de suelo que sale hacia la siguiente operación unitaria y se representa mediante la Ecuación 21 **Ecuación 9**.

$$\frac{\text{suelo sembrado de salida (ha)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{suelo surcado de entrada (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 21

La cantidad de implementos amortizados a la cantidad de producción de azúcar para llevar a cabo las labores en campo se presentan en la Ecuación 22 **Ecuación 16Ecuación 4**.

$$\frac{\text{Cantidad de azadón (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{cantidad de azadón (kg)}}{\text{hectáreas de cultivo (ha)}} * \frac{\frac{\text{horas de trabajo (h)} * \text{zafra (año)}}{\text{días de trabajo (día)}} * \frac{\text{días de trabajo (día)}}{\text{zafra (año)}}}{\frac{\text{caña cosechada (ton)}}{\text{hectáreas de cultivo (ha)}}} * \frac{\text{caña cosechada} * \% \text{ materia extraña (ton)}}{\text{producción total de azúcar (100 g)}}$$

Ecuación 22

Para conocer la cantidad de semillas requeridas para una hectárea, se estimó con la Ecuación 23. La cuál relaciona la cantidad de semilla necesaria por unidad funcional, el rendimiento de un terreno destinado a semillero y el tiempo de vida útil de dichas semillas.

$$\frac{\text{semillas (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{caña cosechada * \% materia extraña (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}}{\frac{\text{rendimiento (ha)}}{\frac{\text{año}}{\frac{\text{vida útil de semillas (ton)}}{\text{año}}}}}$$

Ecuación 23

La cantidad de agua que se utilizó para la siembra se estimó con la Ecuación 24. En esta se describe la proporción de agua precipitada y un factor de proporcionalidad de acuerdo con el tiempo estimado de caída de lluvia en la región.

$$\frac{\text{agua precipitada (m}^3\text{)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \text{Factor de proporción} * \frac{\frac{\text{agua total precipitada } \frac{\text{m}^3}{\text{ha}}}{\frac{\text{hectáreas total cultivadas ha}}{\frac{\text{caña total producida (ton)}}{\text{hectáreas (ha)}}}}$$

Ecuación 24

La cantidad de transporte necesario para las semillas se calculó con la Ecuación 25. En ella se expresa la distancia recorrida por vehículo y la cantidad de materia prima necesaria para la producción de la unidad funcional.

$$\frac{\text{cantidad transportada (tonkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{semillas (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 25

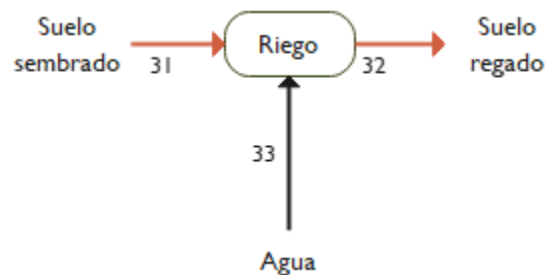


Figura 51. Flujos de entrada y salida durante el riego

Fuente: elaboración propia

La cantidad de suelo que se utilizó en el riego es la misma cantidad que la que se surcará. Por lo tanto, la Ecuación 26 representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{suelo sembrado de salida (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{suelo sembrado de entrada (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 26

La cantidad de suelo surcado es la misma cantidad de suelo que sale hacia la siguiente operación unitaria y se representa mediante la Ecuación 27.

$$\frac{\text{suelo surcado de entrada (ha)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{suelo surcado de salida (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 27

La cantidad de agua que se utilizó se estimó con la Ecuación 28. En esta se describe la cantidad de agua precipitada y la cantidad de agua utilizada del cauce artificial.

$$\frac{\text{agua total (m}^3\text{)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{agua total precipitada } \frac{\text{m}^3}{\text{ha}}}{\frac{\text{hectáreas total cultivadas ha}}{\frac{\text{caña total producida (ton)}}{\text{hectáreas (ha)}}}} + \frac{\frac{\text{agua total de río } \frac{\text{m}^3}{\text{ha}}}{\frac{\text{hectáreas total cultivadas ha}}{\frac{\text{caña total producida (ton)}}{\text{hectáreas (ha)}}}}$$

Ecuación 28

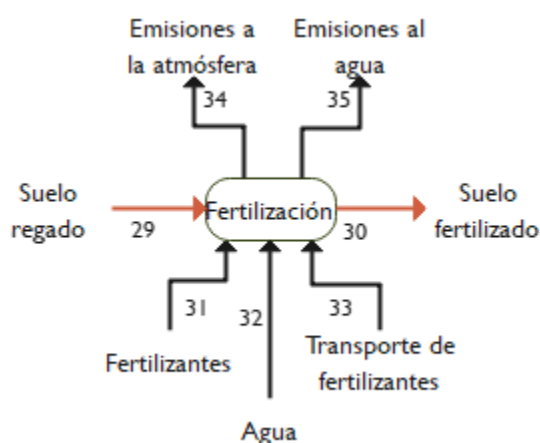


Figura 52. Flujos de entrada y salida durante la fertilización

Fuente: elaboración propia

La cantidad de suelo que se utilizó en durante la fertilización es la misma cantidad que la que se regó. Por lo tanto, la Ecuación 29 representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{suelo regado de salida (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{suelo regado de entrada (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 29

La cantidad de suelo fertilizado es la misma cantidad de suelo que sale hacia la siguiente operación unitaria y se representa mediante la Ecuación 30 **Ecuación 27Ecuación 9.**

$$\frac{\text{suelo fertilizado de salida (ha)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{suelo fertilizado de entrada (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 30

Los fertilizantes utilizados se contabilizaron mediante la Ecuación 31. En ella se representa la cantidad de bultos utilizados durante el periodo estudiado y la cantidad de azúcar producida.

$$\frac{\text{Fertilizante (kg)}}{\text{Producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{bultos} \left(\frac{\text{bulto}}{\text{año}} \right) * \frac{\text{peso de bulto (kg)}}{(\text{bulto})} * \text{rendimiento} \left(\frac{\text{año}}{\text{ha}} \right)}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 31

La cantidad de agua que se utilizó durante la fertilización se estimó con la Ecuación 32 **Ecuación 24.** En esta se describe la proporción de agua precipitada y un factor de proporcionalidad de acuerdo con el tiempo estimado de caída de lluvia en la región.

$$\frac{\text{agua precipitada (m}^3\text{)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \text{Factor de proporción} * \frac{\frac{\text{agua total precipitada} \frac{\text{m}^3}{\text{ha}}}{\text{hectáreas total cultivadas ha}}}{\frac{\text{caña total producida (ton)}}{\text{hectáreas (ha)}}}$$

Ecuación 32

La cantidad de transporte necesario para los fertilizantes se calculó con la Ecuación 33 **Ecuación 25.** En ella se expresa la distancia recorrida por vehículo y la cantidad de insumo requerido.

$$\frac{\text{cantidad transportada (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{fertilizante (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 33

La cantidad de emisiones contabilizadas se estimaron a través de factores de emisión vinculadas a la cantidad máxima utilizada durante la producción de azúcar. Las operaciones se muestran en la Ecuación 34 y Ecuación 35.

$$\frac{\text{emisión atmosférica (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \text{factor de emisión} * \frac{\text{Fertilizante (kg)}}{\text{Producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 34

$$\frac{\text{emisión al agua (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \text{factor de emisión} * \frac{\text{Fertilizante (kg)}}{\text{Producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 35

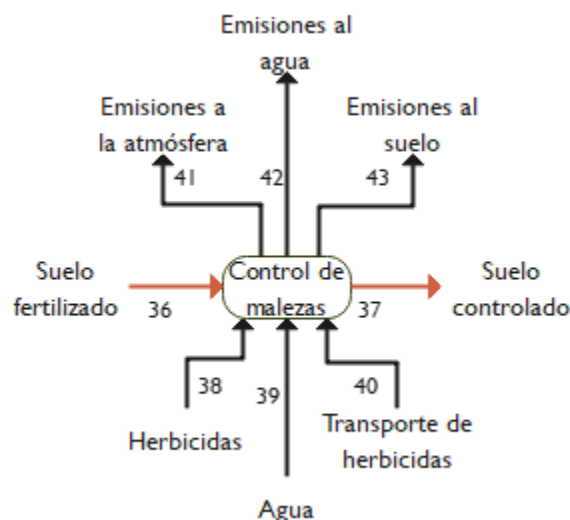


Figura 53. Flujos de entrada y salida durante el control de malezas

Fuente: elaboración propia

La cantidad de suelo que se utilizó en durante la fertilización es la misma cantidad que la que se regó. Por lo tanto, la Ecuación 36 **Ecuación 29** representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{suelo fertilizado de salida (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{suelo fertilizado de entrada (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 36

La cantidad de suelo fertilizado es la misma cantidad de suelo que sale hacia la siguiente operación unitaria y se representa mediante la Ecuación 37 **Ecuación 27** **Ecuación 9**.

$$\frac{\text{suelo controlado de salida (ha)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{suelo controlado de entrada (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 37

Los herbicidas utilizados se contabilizaron mediante la Ecuación 38 **Ecuación 31**. En ella se representa la cantidad de bultos utilizados durante el periodo estudiado y la cantidad de azúcar producida.

$$\frac{\text{Herbicida (kg)}}{\text{Producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{bultos} \left(\frac{\text{bulto}}{\text{año}} \right) * \frac{\text{peso de bulto (kg)}}{(\text{bulto})} * \text{rendimiento} \left(\frac{\text{año}}{\text{ha}} \right)}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 38

La cantidad de agua que se utilizó durante la aplicación de los herbicidas se estimó con la Ecuación 39. En esta se describe la proporción de agua precipitada y un factor de proporcionalidad de acuerdo con el tiempo estimado de caída de lluvia en la región.

$$\frac{\text{agua precipitada (m}^3\text{)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \text{Factor de proporción} * \frac{\frac{\text{agua total precipitada (m}^3\text{)}}{\text{ha}}}{\frac{\text{hectáreas total cultivadas (ha)}}{\text{caña total producida (ton)}}}$$

Ecuación 39

La cantidad de transporte necesario para los fertilizantes se calculó con la Ecuación 40. En ella se expresa la distancia recorrida por vehículo y la cantidad de insumo requerido.

$$\frac{\text{cantidad de transporte (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{herbicida (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 40

La cantidad de emisiones contabilizadas se estimaron a través de factores de emisión vinculadas a la cantidad máxima utilizada durante la producción de azúcar. Las operaciones se muestran en las Ecuación 41, Ecuación 42 y Ecuación 43.

$$\frac{\text{emisión atmosférica (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \text{factor de emisión} * \frac{\text{herbicida (kg)}}{\text{Producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 41

$$\frac{\text{emisión al agua (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \text{factor de emisión} * \frac{\text{herbicida (kg)}}{\text{Producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 42

$$\frac{\text{emisión al suelo (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \text{factor de emisión} * \frac{\text{herbicida (kg)}}{\text{Producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 43

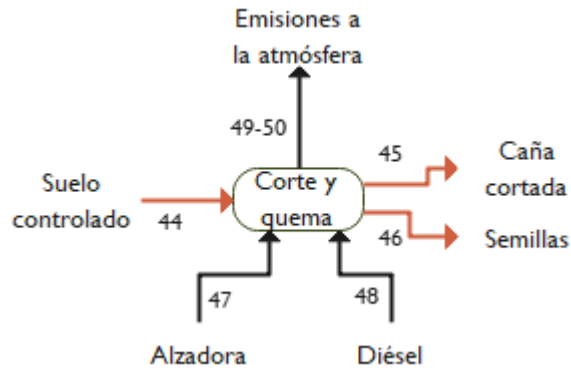


Figura 54. Flujos de entrada y salida durante la quema y corte
Fuente: elaboración propia

La cantidad de suelo que se utilizó en durante la aplicación de herbicidas es la misma cantidad que se cosecha. Por lo tanto, la Ecuación 44 ~~Ecuación 36~~ ~~Ecuación 29~~ representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{suelo controlado de salida (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{suelo controlado de entrada (ha)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 44

De la cantidad de suelo quemado y cortado se obtiene la caña cortada lista para ser embarcada y procesada en la fábrica. La Ecuación 45 representa el cálculo seguido ~~Ecuación 27~~ ~~Ecuación 9~~.

$$\frac{\text{caña total cosechada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña total cosechada (g)} + \text{rocas} + \text{hojas} + \text{tierra (g)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 45

Por otra parte, cuando un campo es destinado a la producción de semilla se calculó con la Ecuación 46.

$$\frac{\text{semillas totales (g)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{caña total cosechada (g)} + \text{rocas} + \text{hojas} + \text{tierra (g)}}{\text{producción de azúcar (g)}}}{\text{rendimiento} \frac{\text{ha}}{\text{año}} * \text{tiempo de vida útil} \frac{\text{años}}{\text{ha}}}$$

Ecuación 46

El uso de la alzada de caña se estimó con la Ecuación 47.

$$\frac{\text{Cantidad de alzadora (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de alzadora (kg)}}{\text{hectáreas de cultivo (ha)}} * \frac{\text{horas de trabajo (h)} * \text{zafra (año)} * \frac{\text{días de trabajo (día)}}{\text{zafra (año)}}}{\text{horas de vida útil de tractor (h)}} * \frac{\text{caña cosechada (ton)}}{\text{hectáreas de cultivo (ha)}} * \frac{\text{caña cosechada} * \% \text{ materia extraña (ton)}}{\text{producción total de azúcar (100 g)}}$$

Ecuación 47

La cantidad de diésel contabilizado para el uso del tractor durante las horas de trabajo se muestran en la Ecuación 48 **Ecuación 12**.

$$\frac{\text{diésel (L)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{litros de diésel (L)}}{\text{días de trabajo (día)}} * \frac{\text{días de trabajo (día)}}{\text{zafra (año)}}}{\frac{\text{producción de azúcar (g)}}{\text{zafra (año)}}}$$

Ecuación 48

Las emisiones generadas por el consumo del diésel se contabilizaron con la Ecuación 51. Se multiplicó un factor de emisión por la cantidad de diésel utilizados para la operación del tractor, calculado en la Ecuación 49.

$$\frac{\text{emisión de dióxido de carbono (kg CO}_2\text{)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{2.61 \text{ kg CO}_2}{\text{L de diésel}} * \frac{\text{diésel (L)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 49

En la Ecuación 51 se muestra la ecuación utilizada para el cálculo de las emisiones de gases producto de la combustión de la caña de azúcar.

$$\frac{\text{emisión atmosférica (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \text{factor de emisión} * \frac{\text{caña quemada (kg)}}{\text{Producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 50

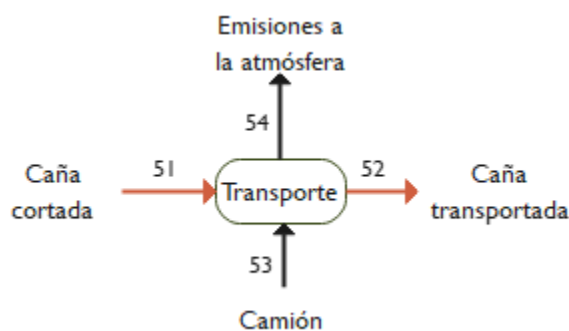


Figura 55. Flujos de entrada y salida durante el transporte de caña

Fuente: elaboración propia

La cantidad de caña que se cortó en la operación de quema y corte corresponde a la misma cantidad de caña que será recibida en la fábrica. Por lo tanto, en la Ecuación 51 se representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{caña total cosechada salida (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña total cosechada de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 51

La cantidad de caña que se transporta y se recibirá en la fábrica es la misma cantidad de caña que entra a los camiones, la cual está representada por Ecuación 52.

$$\frac{\text{caña total cosechada entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña total transportada de salida (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 52

La cantidad de caña transportada se calculó con la Ecuación 53, la cual relaciona la cantidad promedio recorrida por unidad y la cantidad de caña transportada por viaje.

$$\frac{\text{caña transportada (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{caña cortada (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 53

Las emisiones generadas por el transporte de la caña de azúcar se basaron en la Ecuación 54. Se multiplicó un factor de emisión por la cantidad de diésel utilizados para la operación del camión.

$$\frac{\text{emisión de dióxido de carbono (kg CO}_2\text{)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{2.61 \text{ kg CO}_2}{\text{L de diésel}} * \frac{\text{diésel (L)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 54

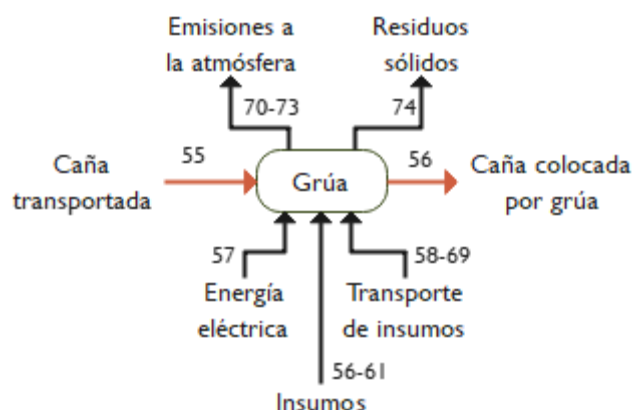


Figura 56. Flujos de entrada y salida durante la operación de la grúa

Fuente: Elaboración propia

La caña transportada por el camión es trasladada por la grúa cañera, en este caso la Ecuación 55 representa dicha igualdad junto con un factor de proporcionalidad respecto al segundo equipo utilizado para la misma función.

$$\frac{\text{caña transportada de salida (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Porcentaje de carga} * \frac{\text{caña colocada por grúa (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 55}$$

Del mismo modo, la cantidad movida por la grúa cañera es la cantidad que sale de dicha operación. Se representa en la Ecuación 56.

$$\frac{\text{caña colocada por grúa (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña colocada de salida (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 56}$$

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de la grúa se contabilizó mediante Ecuación 57. En ella se vincula la potencia del dispositivo, el tiempo de operación de la grúa, un factor de conversión y la cantidad total de azúcar producida.

$$\begin{aligned} & \frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} \\ &= \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)} \\ & \quad \text{Eficiencia del motor} \end{aligned}$$

Ecuación 57

Los distintos insumos utilizados durante la operación y mantenimiento de la grúa se calcularon mediante las ecuaciones Ecuación 58 - Ecuación 63 que representa la cantidad total usada entre la producción total de azúcar.

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Cantidad total de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 58

$$\frac{\text{cable de acero (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Cantidad total de cable de acero (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 59

$$\frac{\text{cable manila (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Cantidad total de cable manila (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 60

$$\frac{\text{gas LP (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Cantidad total de gas LP (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 61

$$\frac{\text{oxígeno (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Cantidad total de oxígeno (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 62

$$\frac{\text{paños para limpieza (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Cantidad total de paños(kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 63

La cantidades de insumos transportados se calcularon con la ecuaciones Ecuación 64 - Ecuación 69, las cuales relacionan la cantidad de insumo transportado y la cantidad de viajes realizados.

$$\frac{\text{electrodo transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodo adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 64

$$\frac{\text{cables de acero transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{cables de acero adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 65

$$\frac{\text{cable manila transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{cable manila adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 66

$$\frac{\text{gas LP transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{gas LP adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 67

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 68

$$\frac{\text{paños transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{paños adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 69

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 70 - Ecuación 73. En ella se relaciona la cantidad de insumo consumido y un factor de emisión vinculado a los gases generados.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 70

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 71

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 72

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 73

Para el caso de los paños para limpieza residuales, se contabilizó la misma cantidad utilizada como residuo generado, por lo tanto, en la Ecuación 74 se representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{paños residuales (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{paños para limpieza (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 74

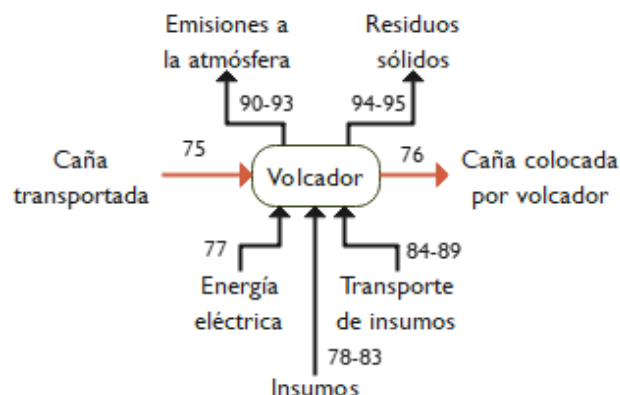


Figura 57. Flujos de entrada y salida durante la operación del volcador de hilos
Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo, la caña transportada por el camión es trasladada por la grúa cañera, en este caso la Ecuación 75 representa dicha igualdad junto con un factor de proporcionalidad respecto al segundo equipo utilizado para la misma función.

$$\frac{\text{caña transportada de salida (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Porcentaje de carga} * \frac{\text{caña colocada por volcador (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 75}$$

Del mismo modo, la cantidad movida por la grúa cañera es la cantidad que sale de dicha operación. Se representa en la Ecuación 76.

$$\frac{\text{caña colocada por volcador (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña colocada de salida (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 76}$$

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del volcador se contabilizó mediante Ecuación 77. En ella se vincula la potencia del dispositivo, el tiempo de operación de la grúa, un factor de conversión y la cantidad total de azúcar producida.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right) * \text{Eficiencia del motor}}$$

Ecuación 77

Los distintos insumos utilizados durante la operación y mantenimiento de la grúa se calcularon mediante las ecuaciones Ecuación 78 - Ecuación 83 que representa la cantidad total usada en operaciones del volcador de hilos entre la producción total de azúcar.

$$\frac{\text{aceite hidráulico (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de aceite hidráulico (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 78

$$\frac{\text{cable de acero (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de cable de acero (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 79

$$\frac{\text{cable manila (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de cable manila (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 80

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 81

$$\frac{\text{oxígeno (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de oxígeno(kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 82

$$\frac{\text{paños (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de paños (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 83

Las cantidades de insumos transportados se calcularon con la ecuaciones Ecuación 84 - Ecuación 89, las cuales relacionan la cantidad de insumo transportado y la cantidad de viajes realizados.

$$\frac{\text{aceite transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{aceite adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 84

$$\frac{\text{cables de acero transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{cables de acero adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 85

$$\frac{\text{cable manila transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{cable manila adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 86

$$\frac{\text{electrodo transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodo adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 87

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 88

$$\frac{\text{paños transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{paños adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 89

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 90 -Ecuación 91. En ella se relaciona la cantidad de insumo consumido y un factor de emisión vinculado a los gases generados.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 90

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 91

Para el caso del aceite residual hidráulico y paños para limpieza residuales, se contabilizó la misma cantidad utilizada como residuo generado, por lo tanto, en las ecuaciones Ecuación 92 - Ecuación 93 se representan dichas igualdades.

$$\frac{\text{aceite residual (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{aceite hidráulico (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 92

$$\frac{\text{paños residuales (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{paños para limpieza (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 93

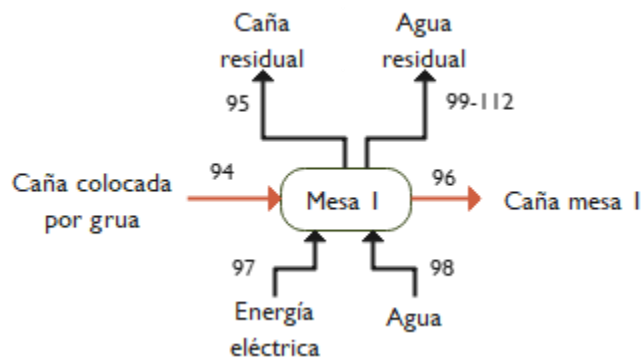


Figura 58. Flujos de entrada y salida de la mesa de alimentación 1
Fuente: Elaboración propia

La caña que es manipulada por la grúa autoestable, es la misma cantidad que recibe la mesa de alimentación 1. En la Ecuación 94 se observa dicha igualdad.

$$\frac{\text{caña de salida colocada por grúa (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña de entrada a mesa 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 94

La salida de caña en este equipo es distinta a la que entra, este cálculo se muestra en la Ecuación 95.

$$\frac{\text{pérdida de caña (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña de entrada a mesa 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \% \text{ de pérdida de caña}$$

Ecuación 95

Del mismo modo, la cantidad de caña que entra es la misma que sale menos la cantidad de caña perdida en operación. Por lo tanto, en la ecuación representa dicho cálculo.

$$\frac{\text{caña de salida a mesa 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña de entrada de mesa 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{perdida de caña (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 96

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de la mesa 1 se contabilizó mediante la Ecuación 97. En ella se vincula la potencia del dispositivo, el tiempo de operación de la grúa, un factor de conversión y la cantidad total de azúcar producida.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 97

La cantidad de agua utilizada se calculó con la Ecuación 98. En ella se relacionan los litros de agua utilizados al día, por el número de días totales de operación y la cantidad total de azúcar producida.

$$\frac{\text{consumo de agua (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{consumo de agua} \left(\frac{\text{L}}{\text{día}} \right) * \text{días de operación (días)}}{\text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{L}}{\text{m}^3} \right) * \text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 98

El agua residual se contabilizó con la ecuación 98, dado que es la misma cantidad que sale del sistema, se representa con la igualdad. Sin embargo, en las ecuaciones siguientes, se incluye su composición.

$$\frac{\text{consumo de agua (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 99

$$\frac{\text{DBO residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{DBO} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 100

$$\frac{\text{nitrógeno residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{nitrógeno} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 101

$$\frac{\text{fósforo residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{fósforo} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 102

$$\frac{\text{arsénico residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{arsénico} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 103

$$\frac{\text{cadmio residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{cadmio} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 104

$$\frac{\text{cianuro residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{cianuro} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 105

$$\frac{\text{cobre residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{cobre} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 106

$$\frac{\text{cromo residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{cromo} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 107

$$\frac{\text{mercurio residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{mercurio} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 108

$$\frac{\text{niquel residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{niquel} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 109

$$\frac{\text{plomo residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{plomo} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 110

$$\frac{\text{zinc residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{zinc} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 111

$$\frac{\text{DQO residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{DQO} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 112

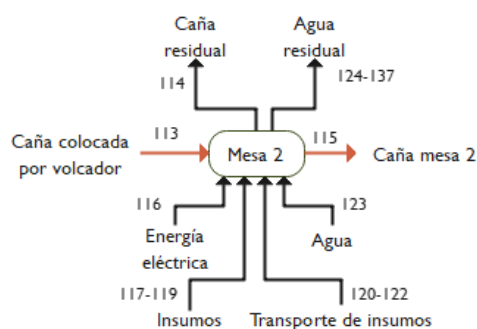


Figura 59. Flujos de entrada y salida de la mesa de alimentación 2
Fuente: Elaboración propia

La caña que es manipulada por la grúa autoestable, es la misma cantidad que recibe la mesa de alimentación 1. En la Ecuación 113 se observa dicha igualdad.

$$\frac{\text{caña de salida colocada por grúa (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña de entrada a mesa 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 113

La salida de caña en este equipo es distinta a la que entra, este cálculo se muestra en la Ecuación 114.

$$\frac{\text{pérdida de caña (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña de entrada a mesa 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \% \text{ de pérdida de caña}$$

Ecuación 114

Del mismo modo, la cantidad de caña que entra es la misma que sale menos la cantidad de caña perdida en operación. Por lo tanto, en la Ecuación 115 representa dicho cálculo.

$$\frac{\text{caña de salida a mesa 2 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña de entrada de mesa 2 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{perdida de caña (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 115

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de la mesa 2 se contabilizó mediante Ecuación 116 **Ecuación 57.**

$$\begin{aligned} & \frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} \\ & \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)} \\ & = \frac{\text{Eficiencia del motor}}{\text{Eficiencia del motor}} \end{aligned}$$

Ecuación 116

Los distintos insumos utilizados durante la operación y mantenimiento de la grúa se calcularon mediante las ecuaciones Ecuación 117 - Ecuación 119 que representa la cantidad total usada entre la producción total de azúcar.

$$\frac{\text{aceite hidráulico 1 (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de aceite 1 hidráulico (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 117

$$\frac{\text{aceite hidráulico 2 (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de aceite 2 hidráulico (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 118

$$\frac{\text{paños para limpieza (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de paños para limpieza (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 119

La cantidades de insumos transportados se calcularon con la ecuaciones Ecuación 120 - Ecuación 122, las cuales relacionan la cantidad de insumo transportado y la cantidad de viajes realizados.

$$\frac{\text{aceite 1 transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{aceite 1 adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 120

$$\frac{\text{aceite 2 transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{aceite 2 adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 121

$$\frac{\text{pañes transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{pañes adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 122

La cantidad de agua utilizada se calculó con la Ecuación 123. En ella se relacionan los litros de agua utilizados al día, por el número de días totales de operación y la cantidad total de azúcar producida.

$$\frac{\text{consumo de agua (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{consumo de agua } \left(\frac{\text{L}}{\text{día}}\right)}{\text{Factor de conversión } \left(\frac{\text{L}}{\text{m}^3}\right)} * \frac{\text{días de operación (días)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 123

El agua residual es la misma cantidad que sale del sistema, se representa con la igualdad de la Ecuación 124.

$$\frac{\text{consumo de agua (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 124

$$\frac{\text{DBO residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{DBO } \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión } \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}}\right)$$

Ecuación 125

$$\frac{\text{nitrógeno residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{nitrógeno } \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión } \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}}\right)$$

Ecuación 126

$$\frac{\text{fósforo residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{fósforo} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 127

$$\frac{\text{arsénico residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{arsénico} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 128

$$\frac{\text{cadmio residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{cadmio} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 129

$$\frac{\text{cianuro residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{cianuro} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 130

$$\frac{\text{cobre residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{cobre} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 131

$$\frac{\text{cromo residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{cromo} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 132

$$\frac{\text{mercurio residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{mercurio} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 133

$$\frac{\text{niquel residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{niquel} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 134

$$\frac{\text{plomo residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{plomo} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 135

$$\frac{\text{zinc residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{zinc} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 136

$$\frac{\text{DQO residual (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{DQO} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) * \frac{\text{agua residual (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{factor de conversión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mg}} \right)$$

Ecuación 137

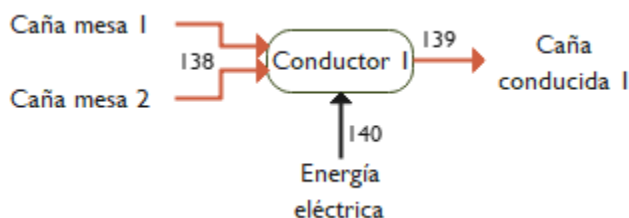


Figura 60. Flujos de entrada y salidas del conductor de alimentación I
Fuente: Elaboración propia

Para este equipo las salidas de las mesas 1 y 2 son recibidas por el conductor 1. En la Ecuación 138 se representa la suma.

$$\frac{\text{caña de salida a mesa 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{caña de salida a mesa 2 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña de entrada a conductor 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 138

La caña que sale del conductor de alimentación 1 es la misma cantidad de caña que entró, por lo tanto, en la Ecuación 139.

$$\frac{\text{caña de entrada a conductor 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña de salida a conductor 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 139

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del conductor 1 se contabilizó mediante Ecuación 140.

$$\frac{\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}}}{\frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión } \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}}\right) * \text{horas de funcionamiento } \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}}\right)}{\frac{\text{producción total de azúcar } \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}}\right)}} = \frac{\text{Eficiencia del motor}}{\text{Eficiencia del motor}}$$

Ecuación 140

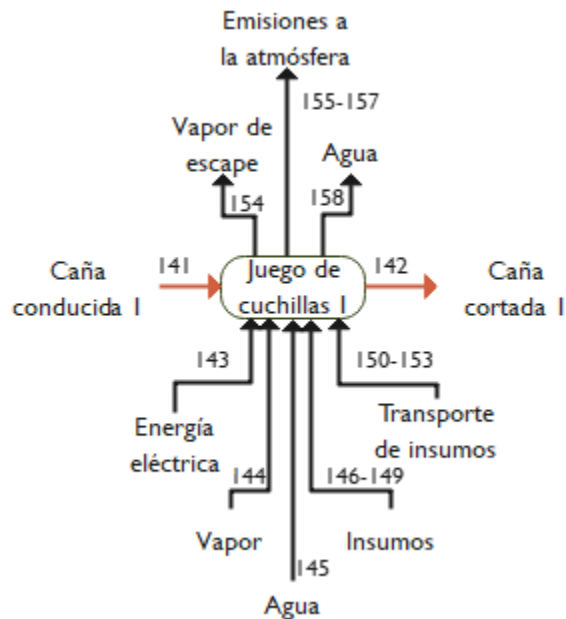


Figura 61. Flujos de entrada y salida del juego de cuchillas 1

Fuente: Elaboración propia

La caña que sale del conductor de caña 1 es la caña que entra al juego de cuchillas 1. En la Ecuación 141 se demuestra la igualdad.

$$\frac{\text{caña de salida de conductor 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña de entrada a juego de cuchillas 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 141

Del mismo modo, la caña que entra al sistema es la misma cantidad de caña que sale después de la operación. En la Ecuación 144 se demuestra.

$$\frac{\text{caña de entrada a juego de cuchillas 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña de salida a juego de cuchillas 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 142

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del juego de cuchillas 1 se contabilizó mediante Ecuación 143.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 143

La cantidad de vapor consumida para operar el equipo se calculó con la ecuación 146. En ella se considera la cantidad de vapor consumido a lo largo del año y la entalpía estimada para la presión y temperaturas obtenidas. La cantidad de vapor para este equipo se calculó con la Ecuación 144.

$$\frac{\text{energía (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{vapor consumido (ton)}}{\text{hora}} * \text{horas total (hora)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{entalpía calculada} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 144

La cantidad de agua utilizada para el enfriamiento de la maquinaria se calculó con la Ecuación 145. En ella se relaciona la cantidad de agua registrada por hora y el número de horas totales de trabajo.

$$\frac{\text{agua de enfriamiento (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua consumida} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \right) * \text{horas de consumo total (horas)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 145

La cantidad de insumos utilizados para el mantenimiento de las cuchillas se calcularon con las siguientes ecuaciones

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 146

$$\frac{\text{aceite}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de aceite (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 147

$$\frac{\text{oxígeno}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de oxígeno (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 148

$$\frac{\text{paños}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de paños (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 149

La cantidades de insumos transportados se calcularon con la ecuaciones Ecuación 150 - Ecuación 153, las cuales relacionan la cantidad de insumo transportado y la cantidad de viajes realizados.

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 150

$$\frac{\text{aceite transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{aceite adquirido total (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 151

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 152

$$\frac{\text{paños transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{paños adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 153

La cantidad de vapor de escape contabilizada para esta operación se muestra en la Ecuación 154. En ella, se compara la energía de entrada respecto a la energía de salida, mediante las entalpías obtenidas.

$$\frac{\text{vapor de escape (MJ)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{ton de vapor (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \text{entalpía de vapor escape} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 154

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 155 - Ecuación 157. En ella se relaciona la cantidad de insumo consumido y un factor de emisión vinculado a los gases generados.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 155

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 156

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 157

El agua utilizada para enfriamiento consumida es la misma cantidad de agua de salida hacia los tanques de recepción. La Ecuación 158 muestra dicha igualdad.

$$\frac{\text{agua de enfriamiento entrada (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua de enfriamiento salida (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 158

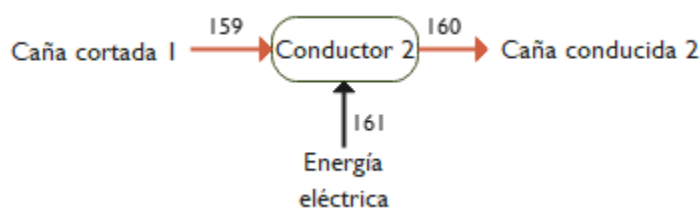


Figura 62. Flujos de entrada y salida del conductor de caña 2
Fuente: Elaboración propia

Para este equipo las salidas de las mesas 1 y 2 son recibidas por el conductor 1. En la Ecuación 159 se representa la suma.

$$\frac{\text{caña cortada 1 de salida (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña cortada 1 de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 159

La caña que sale del conductor de alimentación 1 es la misma cantidad de caña que entró, por lo tanto, en la Ecuación 160 se representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{caña cortada 1 de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña conducida 2 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 160

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del conductor 2 se contabilizó mediante la Ecuación 161.

$$= \frac{\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} \cdot \text{Potencia motor (hp)} \cdot \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) \cdot \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 161

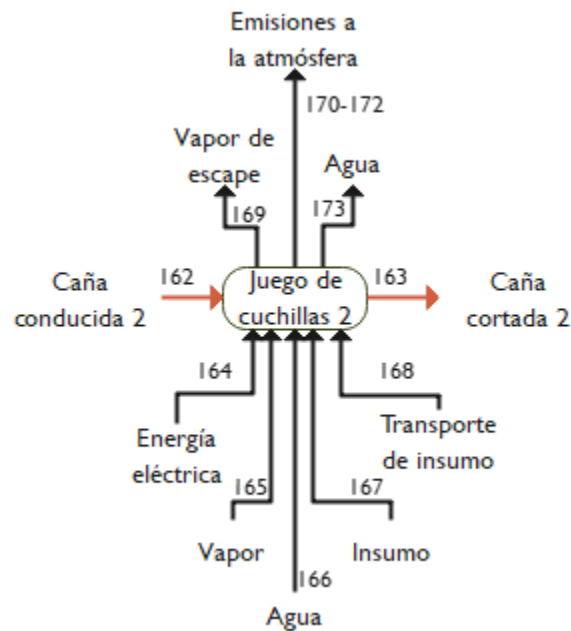


Figura 63. Flujos de entrada y salida del juego de cuchillas 2

Fuente: Elaboración propia

La caña que sale del conductor de caña 1 es la caña que entra al juego de cuchillas 1. En la Ecuación 162 se demuestra la igualdad.

$$\frac{\text{caña de salida de conductor 2 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña de entrada a juego de cuchillas 2 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 162

Del mismo modo, la caña que entra al sistema es la misma cantidad de caña que sale después de la operación. En la Ecuación 163 se demuestra dicha operación.

$$\frac{\text{caña de entrada a juego de cuchillas 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña de salida a juego de cuchillas 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 163

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del juego de cuchillas 2 se contabilizó mediante la Ecuación 164.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 164

La cantidad de vapor consumida para operar el equipo se calculó con la Ecuación 165. En ella se considera la cantidad de vapor consumida a lo largo del año y la entalpía estimada para la presión y temperaturas obtenidas.

$$\frac{\text{energía (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{vapor consumido (ton)}}{\text{hora}} * \text{horas total (hora)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{entalpía calculada} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 165

La cantidad de agua utilizada para el enfriamiento de la maquinaria se calculó con la Ecuación 166.

$$\frac{\text{agua de enfriamiento (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua consumida} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \right) * \text{horas de consumo total (horas)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 166

La cantidad de insumos utilizados para el mantenimiento de las cuchillas se calcularon con la Ecuación 167.

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 167

La cantidades de insumos transportados se calcularon con la Ecuación 168, las cuales relacionan la cantidad de insumo transportado y la cantidad de viajes realizados.

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 168

La cantidad de vapor de escape contabilizada para esta operación se muestra en la Ecuación 169.

$$\frac{\text{vapor de escape (MJ)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{ton de vapor (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \text{entalpía de vapor escape} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 169

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 170 - Ecuación 172. En ella se relaciona la cantidad de insumo consumido y un factor de emisión vinculado a los gases generados.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 170

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 171

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 172

El agua utilizada para enfriamiento consumida es la misma cantidad de agua de salida hacia los tanques de recepción. La Ecuación 173 muestra dicha igualdad.

$$\frac{\text{agua de enfriamiento entrada (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua de enfriamiento salida (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 173

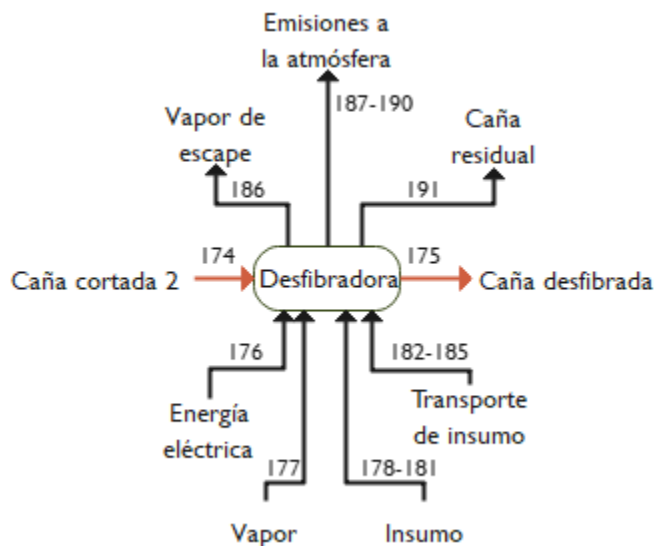


Figura 64. Flujos de entrada y salida de la desfibradora

Fuente: Elaboración propia

La caña que sale del juego de cuchillas 2 es la caña que entra la desfibradora. En la Ecuación 174 se demuestra la igualdad.

$$\frac{\text{caña de salida a juego de cuchillas 2 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña de entrada a desfibradora (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 174

Del mismo modo, la caña que entra al sistema es la misma cantidad de caña que sale después de la operación. En la Ecuación 175 se muestra dicha operación.

$$\frac{\text{caña de entrada a desfibradora (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña de salida de desfibradora (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \frac{\text{pérdida de caña (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 175

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de la desfibradora se contabilizó mediante la Ecuación 176.

$$\begin{aligned} & \frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} \\ & \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión } \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}}\right) * \text{horas de funcionamiento } \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}}\right)}{\text{producción total de azúcar } \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}}\right)} \\ & = \frac{\text{Eficiencia del motor}}{\text{Eficiencia del motor}} \end{aligned}$$

Ecuación 176

La cantidad de vapor consumida para operar el equipo se calculó con la Ecuación 177. En ella se considera la cantidad de vapor consumida a lo largo del año y la entalpía estimada para la presión y temperaturas obtenidas.

$$\frac{\text{energía (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{vapor consumido (ton)}}{\text{hora}} * \text{horas total (hora)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{entalpía calculada} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 177

La cantidad de insumos utilizados para el mantenimiento de las cuchillas se calcularon con las ecuaciones Ecuación 178 - Ecuación 181.

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 178

$$\frac{\text{aceite}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de aceite (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 179

$$\frac{\text{gas LP}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de oxígeno (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 180

$$\frac{\text{paños}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de paños (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 181

La cantidades de insumos transportados se calcularon con la ecuaciones Ecuación 182 - Ecuación 185, las cuales relacionan la cantidad de insumo transportado y la cantidad de viajes realizados.

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 182

$$\frac{\text{aceite transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{aceite adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 183

$$\frac{\text{gas LP transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{gas LP adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 184

$$\frac{\text{paños transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{paños adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 185

La cantidad de vapor de escape contabilizada para esta operación se muestra en la Ecuación 186. En ella, se compara la energía de entrada respecto a la energía de salida, mediante las entalpías obtenidas.

$$\frac{\text{vapor de escape (MJ)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{ton de vapor (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \text{entalpía de vapor escape} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 186

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 187 - Ecuación 190. En ella se relaciona la cantidad de insumo consumido y un factor de emisión vinculado a los gases generados.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 187

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 188

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 189

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 190

La salida de caña en este equipo es distinta a la que entra, este cálculo se muestra en la ecuación.

$$\frac{\text{pérdida de caña (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \% \text{ de pérdida de caña}$$

Ecuación 191

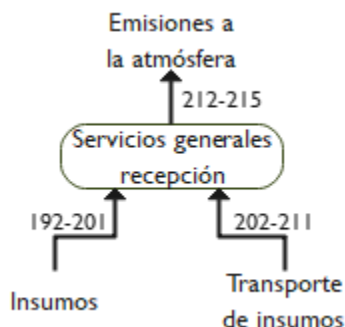


Figura 65. Flujos de entrada y salida de los servicios generales de la recepción
Fuente: Elaboración propia

Los insumos que no se detectaron de manera específica para los equipos individuales se colocaron en el apartado de servicios generales para la recepción de materia prima. A continuación, se especifican las ecuaciones utilizadas.

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 192

$$\frac{\text{aceites (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de aceites (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 193

$$\frac{\text{cal (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de cal (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 194

$$\frac{\text{cemento (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de cemento (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 195

$$\frac{\text{gas LP (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de gas LP (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 196

$$\frac{\text{grasas (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de grasas (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 197

$$\frac{\text{oxígeno (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de oxígeno (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 198

$$\frac{\text{cadena de ingeniería (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de cadena (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 199

$$\frac{\text{paños (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de paños (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 200

$$\frac{\text{óxido de calcio (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de óxido de calcio (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 201

La cantidades de insumos transportados se calcularon con la ecuaciones Ecuación 202 - Ecuación 211, las cuales relacionan la cantidad de insumo transportado y la cantidad de viajes realizados.

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 202

$$\frac{\text{aceites transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{aceites adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 203

$$\frac{\text{cal transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cal adquirida (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 204

$$\frac{\text{cemento transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cemento adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 205

$$\frac{\text{gas LP transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{gas LP adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 206

$$\frac{\text{grasas transportadas (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{grasas adquiridas (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 207

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 208

$$\frac{\text{cadena transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cadena adquirida (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 209

$$\frac{\text{paños transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{paños adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 210

$$\frac{\text{óxido de calcio transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{óxido de calcio adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de vi.}$$

Ecuación 211

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 212 - Ecuación 215. En ella se relaciona la cantidad de insumo consumido y un factor de emisión vinculado a los gases generados.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 212

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 213

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 214

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 215

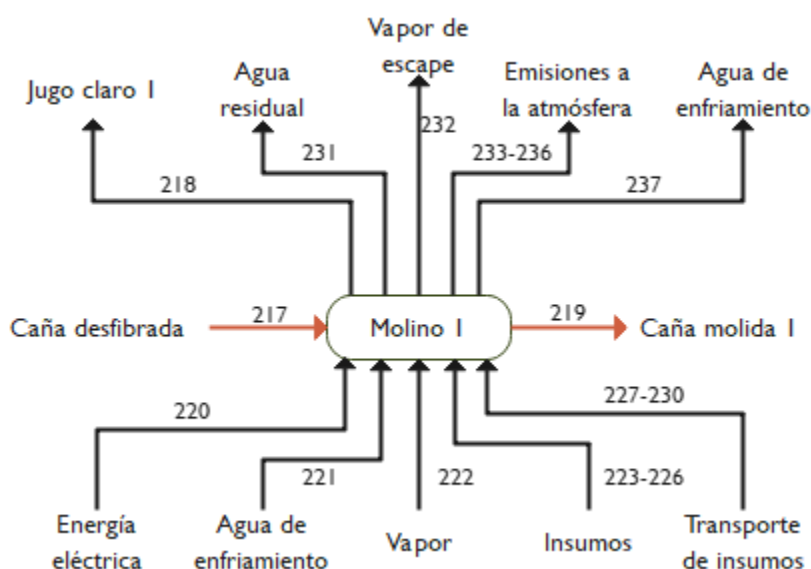


Figura 66. Flujos de entrada y salida que participan en el molino I
Fuente: Elaboración propia

La cantidad de caña desfibrada que se recupera en la desfibradora es la misma cantidad de materia que entra al molino 1. Dicha igualdad se representa en la Ecuación 216.

$$\frac{\text{caña desfibrada de salida (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña desfibrada de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 216

La cantidad de jugo claro que sale del molino 1, se calculó con la Ecuación 217.

$$\frac{\text{jugo claro 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña desfibrada de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\% \text{fibra en caña} + \% \text{jugo en fibra}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 217

La cantidad de caña molida 1 o bagazo de salida se calculó con la Ecuación 218.

$$\frac{\text{caña molida 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña desfibrada de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \% \text{ de fibra en caña desfibrada}$$

Ecuación 218

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del molino 1 se contabilizó mediante la Ecuación 219.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 219

El consumo del agua de enfriamiento se calculó con la Ecuación 220. En ella se relaciona la cantidad total de agua utilizada en el total de molienda por un factor de uso estimado por el consumo de vapor de cada equipo.

$$\frac{\text{agua de enfriamiento (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua turbinas} + \text{agua chumaceras} + \text{agua reductores} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) * \text{días de operación}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \left(\frac{1 \text{ ton}}{1 \text{ m}^3} \right) * \% \text{porcentaje de uso}$$

Ecuación 220

La cantidad de vapor para este equipo se calculó con la Ecuación 221.

$$\frac{\text{energía (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{vapor consumido (ton)}}{\text{hora}} * \text{horas total (hora)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{entalpía calculada} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 221

La cantidad de insumos utilizados para el mantenimiento de las cuchillas se calcularon con las ecuaciones Ecuación 222 - Ecuación 225.

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 222

$$\frac{\text{tornillos}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de aceite (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 223

$$\frac{\text{gas LP}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de oxígeno (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 224

$$\frac{\text{oxígeno}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de paños (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 225

La cantidades de insumos transportados se calcularon con la ecuaciones Ecuación 226 - Ecuación 229, las cuales relacionan la cantidad de insumo transportado y la cantidad de viajes realizados.

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 226

$$\frac{\text{tornillos transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 227

$$\frac{\text{gas LP transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{gas LP consumido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 228

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno consumido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 229

La cantidad de agua de enfriamiento perdida se calculó con la Ecuación 230.

$$\frac{\text{agua de enfriamiento perdida (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{agua perdida } \left(\frac{\text{L}}{\text{h}}\right) * \text{horas de operación (h)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ L}}$$

Ecuación 230

La cantidad de vapor de escape contabilizada para esta operación se muestra en la Ecuación 231. En ella, se compara la energía de entrada respecto a la energía de salida, mediante las entalpías obtenidas.

$$\frac{\text{vapor de escape (MJ)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{ton de vapor (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \text{entalpía de vapor escape } \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}}\right)$$

Ecuación 231

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 232 - Ecuación 235. En ella se relaciona la cantidad de insumo consumido y un factor de emisión vinculado a los gases generados.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión } \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}}\right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 232

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión } \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}}\right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 233

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión } \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}}\right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 234

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión } \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}}\right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 235

La cantidad de agua que se recupera y se devuelve al tanque de almacenamiento, se calculó con la Ecuación 236.

$$\frac{\text{agua enfriamiento recuperada l (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua de enfriamiento (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{agua de enfriamiento perdida (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 236

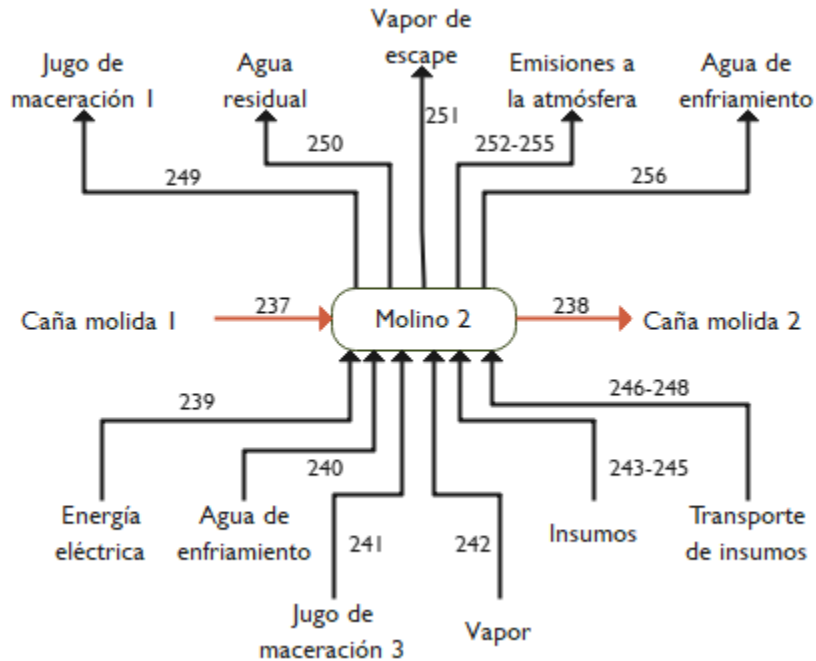


Figura 67. Flujos de entrada y salida del molino 2
Fuente: Elaboración propia

La cantidad de caña molida 1 que entra al molino 2 es la misma cantidad, por lo que la Ecuación 237, representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{caña molida de salida 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña molida 1 de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 237

La cantidad de caña molida 2 se calculó a través de la Ecuación 238, que representa la cantidad de fibra en la cantidad de caña de entrada del molino 1, por lo tanto.

$$\frac{\text{caña molida 2 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{de Fibra en caña} * \frac{\text{caña desfibrada de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 238

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del molino 2 se contabilizó mediante la Ecuación 239.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 239

El consumo del agua de enfriamiento se calculó con la Ecuación 240. En ella se relaciona la cantidad total de agua utilizada en el total de molienda por un factor de uso estimado por el consumo de vapor de cada equipo.

$$\frac{\text{agua de enfriamiento (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua turbinas} + \text{agua chumaceras} + \text{agua reductores} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) * \text{días de operación (días)} * \% \text{porcentaje de uso} * \left(\frac{1 \text{ ton}}{1 \text{ m}^3} \right)}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 240

La cantidad de jugo de maceración 3 es la misma cantidad de jugo de maceración que sale del molino 3, por lo tanto, la igualdad se representa en la Ecuación 241.

$$\frac{\text{jugo de maceración 3 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo de maceración 3 de salida (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 241

La cantidad de vapor para este equipo se calculó con la Ecuación 242.

$$\frac{\text{energía (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{vapor consumido (ton)}}{\text{hora}} * \text{horas total (hora)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{entalpía calculada} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 242

La cantidad de insumos utilizados para el mantenimiento de las cuchillas se calcularon con las siguientes ecuaciones Ecuación 243 - Ecuación 245.

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 243

$$\frac{\text{tornillos}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de aceite (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 244

$$\frac{\text{oxígeno}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de paños (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 245

La cantidades de insumos transportados se calcularon con la ecuaciones Ecuación 246 - Ecuación 248, las cuales relacionan la cantidad de insumo transportado y la cantidad de viajes realizados.

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 246

$$\frac{\text{tornillos transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 247

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno consumido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 248

La cantidad de jugo de maceración 1 es la misma cantidad de jugo de maceración 3 de entrada, dicha igualdad se representa con la Ecuación 249:

$$\frac{\text{jugo de maceración 1 salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo de maceración 3 de entrada (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 249

La cantidad de agua de enfriamiento perdida se calculó con la Ecuación 250.

$$\frac{\text{agua de enfriamiento perdida (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{agua perdida } \left(\frac{L}{h}\right) * \text{horas de operación (h)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ L}}$$

Ecuación 250

La cantidad de vapor de escape contabilizada para esta operación se muestra en la Ecuación 251. En ella, se compara la energía de entrada respecto a la energía de salida, mediante las entalpías obtenidas.

$$\frac{\text{vapor de escape (MJ)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{ton de vapor (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \text{entalpía de vapor escape } \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}}\right)$$

Ecuación 251

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 252 - Ecuación 255. En ella se relaciona la cantidad de insumo consumido y un factor de emisión vinculado a los gases generados.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 252

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 253

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 254

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 255

La cantidad de agua que se recupera y se devuelve al tanque de almacenamiento, se calculó con la Ecuación 256.

$$\frac{\text{agua enfriamiento recuperada 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua de enfriamiento (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{agua de enfriamiento perdida (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 256

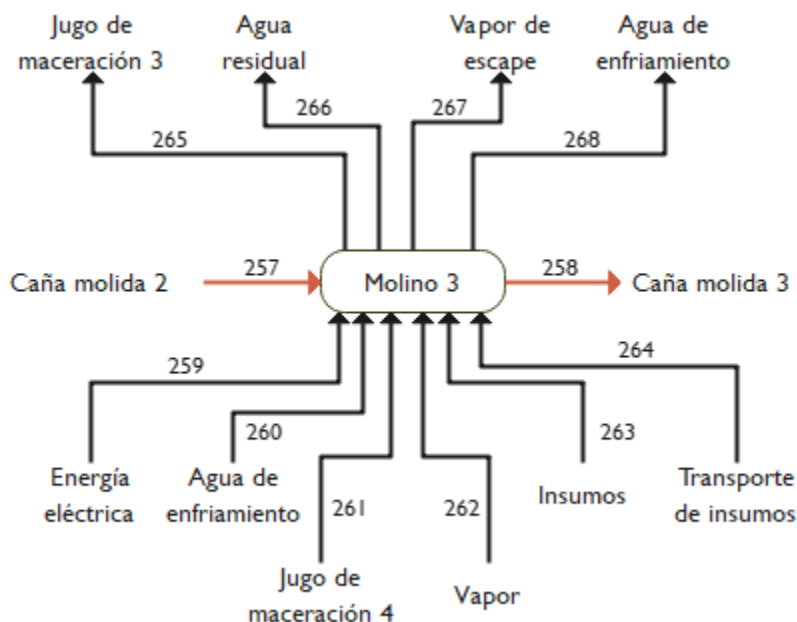


Figura 68. Flujos de entrada y salida del molino 3

Fuente: Elaboración propia

La cantidad de caña molida 2 que entra al molino 3 es la misma cantidad que sale del molino 2, por lo que la Ecuación 257, representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{caña molida de salida 2 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña molida 2 de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 257

La cantidad de caña molida 3 que sale del sistema, es la misma cantidad de caña molida 2 que entra al molino 3, por lo que la Ecuación 258 representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{caña molida 3 de salida (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña molida 2 de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 258

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del molino 3 se contabilizó mediante la Ecuación 259.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 259

El consumo del agua de enfriamiento se calculó con la Ecuación 260. En ella se relaciona la cantidad total de agua utilizada en el total de molienda por un factor de uso estimado por el consumo de vapor de cada equipo.

$$\frac{\text{agua de enfriamiento (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua turbinas} + \text{agua chumaceras} + \text{agua reductores}}{\text{producción de azúcar (g)}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) * \text{días de operación (días)} * \% \text{porcentaje de uso} * \left(\frac{1 \text{ ton}}{1 \text{ m}^3} \right)$$

Ecuación 260

La cantidad de jugo de maceración 4 que entra al molino 3, es la misma cantidad de jugo de maceración que sale del molino 4, por lo tanto, la igualdad se representa en la Ecuación 261.

$$\frac{\text{jugo de maceración 3 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo de maceración 4 de salida (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 261

La cantidad de vapor para este equipo se calculó con la Ecuación 262.

$$\frac{\text{energía (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{vapor consumido (ton)}}{\text{hora}} * \text{horas total (hora)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{entalpía calculada} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 262

La cantidad de insumos utilizados para el mantenimiento de las cuchillas se calcularon con la Ecuación 263.

$$\frac{\text{tornillos}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de aceite (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 263

La cantidades de insumos transportados se calcularon con la Ecuación 264, las cuales relacionan la cantidad de insumo transportado y la cantidad de viajes realizados.

$$\frac{\text{tornillos transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 264

La cantidad de jugo de maceración 3 es la misma cantidad de jugo de maceración 4 de entrada, dicha igualdad se representa con la Ecuación 265

$$\frac{\text{jugo de maceración 3 salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo de maceración 3 de entrada (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 265

La cantidad de agua de enfriamiento perdida se calculó con la Ecuación 266.

$$\frac{\text{agua de enfriamiento perdida (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{agua perdida} \left(\frac{\text{L}}{\text{h}} \right) * \text{horas de operación (h)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ L}}$$

Ecuación 266

La cantidad de vapor de escape contabilizada para esta operación se muestra en la Ecuación 267. En ella, se compara la energía de entrada respecto a la energía de salida, mediante las entalpías obtenidas.

$$\frac{\text{vapor de escape (MJ)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{ton de vapor (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \text{entalpía de vapor escape} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 267

La cantidad de agua que se recupera y se devuelve al tanque de almacenamiento, se calculó con la Ecuación 268.

$$\frac{\text{agua enfriamiento recuperada 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua de enfriamiento (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{agua de enfriamiento perdida (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 268

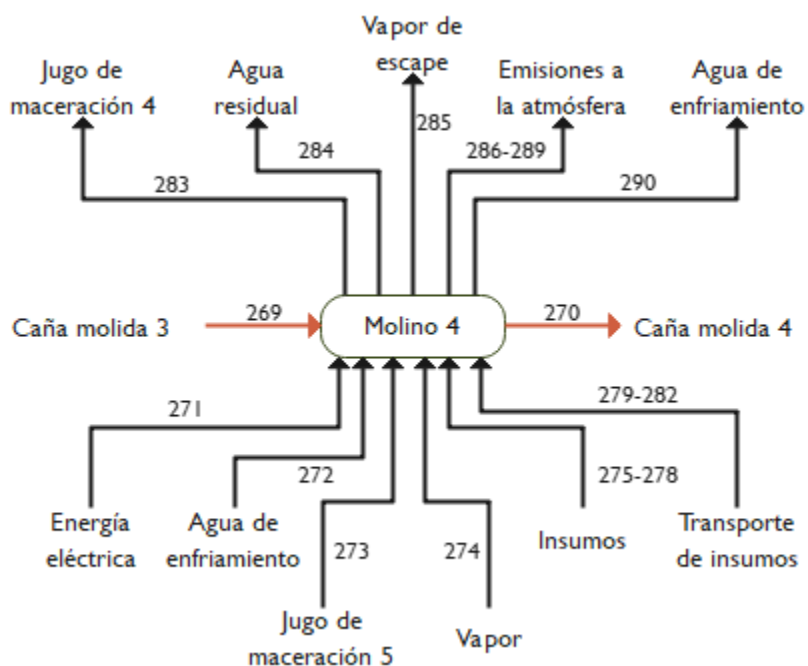


Figura 69. Flujos de entrada y salida del molino 4

Fuente: Elaboración propia

La cantidad de caña molida 3 que entra al molino 4 es la misma cantidad de caña que sale del molino 3, por lo que la Ecuación 269, representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{caña molida 3 de salida (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña molida 3 de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 269

La cantidad de caña molida 4 se calculó a través de la Ecuación 270, que representa la cantidad de fibra en la cantidad de caña de entrada del molino 1, por lo tanto.

$$\frac{\text{caña molida 4 de salida (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña molida 3 de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 270

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del molino 4 se contabilizó mediante la Ecuación 271.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 271

El consumo del agua de enfriamiento se calculó con la Ecuación 272. En ella se relaciona la cantidad total de agua utilizada en el total de molienda por un factor de uso estimado por el consumo de vapor de cada equipo.

$$\frac{\text{agua de enfriamiento (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua turbinas} + \text{agua chumaceras} + \text{agua reductores}}{\text{producción de azúcar (g)}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) * \text{días de operación (días)} * \% \text{porcentaje de uso} * \left(\frac{1 \text{ ton}}{1 \text{ m}^3} \right)$$

Ecuación 272

La cantidad de jugo de maceración 5 que entra al molino 4 es la misma cantidad de jugo de maceración que sale del molino 5, por lo tanto, la igualdad se representa en la Ecuación 273.

$$\frac{\text{jugo de maceración 5 de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo de maceración 5 de salida (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 273

La cantidad de vapor para este equipo se calculó con la Ecuación 274.

$$\frac{\text{energía (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{vapor consumido (ton)}}{\text{hora}} * \text{horas total (hora)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{entalpía calculada} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 274

La cantidad de insumos utilizados para el mantenimiento de las cuchillas se calcularon con las siguientes ecuaciones Ecuación 275 - Ecuación 278.

$$\frac{\text{tornillos}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de aceite (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 275

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 276

$$\frac{\text{oxígeno}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de paños (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 277

$$\frac{\text{gas LP}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de gas LP (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 278

La cantidades de insumos transportados se calcularon con la ecuaciones Ecuación 279 - Ecuación 282, las cuales relacionan la cantidad de insumo transportado y la cantidad de viajes realizados.

$$\frac{\text{tornillos transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 279

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 280

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno consumido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 281

$$\frac{\text{gas LP transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{gas LP total adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 282

La cantidad de jugo de maceración 1 es la misma cantidad de jugo de maceración 3 de entrada, dicha igualdad se representa con la Ecuación 283.

$$\frac{\text{jugo de maceración 3 salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo de maceración 3 de entrada (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 283

La cantidad de agua de enfriamiento perdida se calculó con la Ecuación 284.

$$\frac{\text{agua de enfriamiento perdida (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{agua perdida } \left(\frac{\text{L}}{\text{h}}\right) * \text{horas de operación (h)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ L}}$$

Ecuación 284

La cantidad de vapor de escape contabilizada para esta operación se muestra en la Ecuación 285. En ella, se compara la energía de entrada respecto a la energía de salida, mediante las entalpías obtenidas.

$$\frac{\text{vapor de escape (MJ)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{ton de vapor (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \text{entalpía de vapor escape } \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}}\right)$$

Ecuación 285

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 286 - Ecuación 289. En ella se relaciona la cantidad de insumo consumido y un factor de emisión vinculado a los gases generados.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión } \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}}\right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 286

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión } \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}}\right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 287

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión } \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}}\right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 288

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión } \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}}\right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 289

La cantidad de agua que se recupera y se devuelve al tanque de almacenamiento, se calculó con la Ecuación 290.

$$\frac{\text{agua enfriamiento recuperada 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua de enfriamiento (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{agua de enfriamiento perdida (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 290

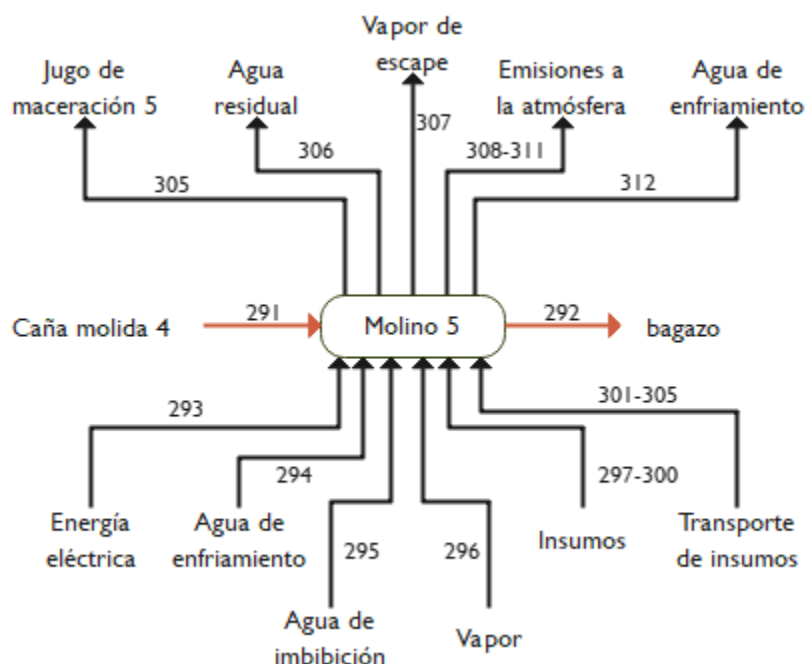


Figura 70. Flujos de entrada y salida del molino 5
Fuente: Elaboración propia

La cantidad de caña molida 4 que entra al molino 5 es la misma cantidad de caña que sale del molino 4, por lo que la Ecuación 291, representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{caña molida 3 de salida (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña molida 3 de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 291

La cantidad de bagazo se calculó a través de la Ecuación 292, que representa la cantidad de fibra en la cantidad de caña de entrada del molino 5, por lo tanto.

$$\frac{\text{bagazo de salida (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{caña molida 4 de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 292

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de la grúa se contabilizó mediante la Ecuación 293.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 293

El consumo del agua de enfriamiento se calculó con la Ecuación 294. En ella se relaciona la cantidad total de agua utilizada en el total de molienda por un factor de uso estimado por el consumo de vapor de cada equipo.

$$\frac{\text{agua de enfriamiento (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua turbinas} + \text{agua chumaceras} + \text{agua reductores} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) * \text{días de operación (días)} * \% \text{porcentaje de uso} * \left(\frac{1 \text{ ton}}{1 \text{ m}^3} \right)}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 294

La cantidad de jugo de agua de imbibición que entra al molino 5 se calculó con la Ecuación 295.

$$\frac{\text{Agua de imbibición (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\% \text{agua de imbibición} * \text{caña desfibrada de entrada (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 295

La cantidad de vapor para este equipo se calculó con la Ecuación 296 **Ecuación 274**.

$$\frac{\text{energía (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{vapor consumido (ton)}}{\text{hora}} * \text{horas total (hora)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{entalpía calculada} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 296

La cantidad de insumos utilizados para el mantenimiento de las cuchillas se calcularon con las siguientes ecuaciones Ecuación 297 - Ecuación 298.

$$\frac{\text{tornillos}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de tornillos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 297

$$\frac{\text{aceite}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de aceite (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 298

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 299

$$\frac{\text{oxígeno}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de paños (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 300

La cantidades de insumos transportados se calcularon con la ecuaciones Ecuación **301** - Ecuación **304**, las cuales relacionan la cantidad de insumo transportado y la cantidad de viajes realizados.

$$\frac{\text{tornillos transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 301

$$\frac{\text{aceites transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{aceites totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 302

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 303

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno consumido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 304

La cantidad de jugo de maceración 1 es la misma cantidad de agua de imbibición de entrada, dicha igualdad se representa con la Ecuación 305:

$$\frac{\text{jugo de maceración 5 salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua de imbibición (ton)} + \text{jugo en fibra (ton)} - \text{bagazo en caña (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 305

La cantidad de agua de enfriamiento perdida se calculó con la Ecuación 306.

$$\frac{\text{agua de enfriamiento perdida (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{agua perdida } \left(\frac{\text{L}}{\text{h}}\right) * \text{horas de operación (h)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ L}}$$

Ecuación 306

La cantidad de vapor de escape contabilizada para esta operación se muestra en la Ecuación 307.

$$\frac{\text{vapor de escape (MJ)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{ton de vapor (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \text{entalpía de vapor escape} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 307

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 308 - Ecuación 311. En ella se relaciona la cantidad de insumo consumido y un factor de emisión vinculado a los gases generados.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 308

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 309

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 310

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 311

La cantidad de agua que se recupera y se devuelve al tanque de almacenamiento, se calculó con la Ecuación 312

$$\frac{\text{agua enfriamiento recuperada l (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua de enfriamiento (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{agua de enfriamiento perdida (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 312

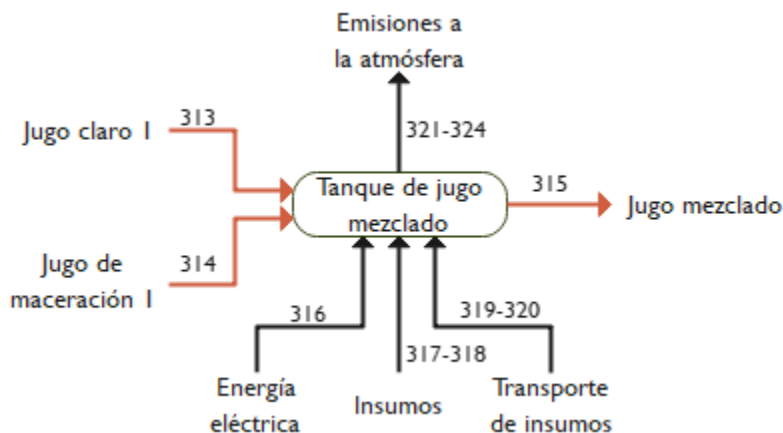


Figura 71. Flujos de entrada y salida del tanque de jugo mezclado
Fuente: Elaboración propia

En este caso la cantidad de jugo recibido proviene de las extracciones realizadas en el molino 1 y el molino 2, por lo que ambas entradas se presentan en las ecuaciones.

$$\frac{\text{jugo claro 1 entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo claro 1 salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 313

$$\frac{\text{jugo de maceración 1 entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo de maceración 1 de salida (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 314

La cantidad de jugo que sale del tanque es la suma del jugo claro 1 de entrada y el juego de maceración 1 de entrada, por lo tanto, la suma se representa en la Ecuación 315.

$$\frac{\text{jugo de mezclado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo claro 1 entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{jugo de maceración 1 entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 315

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del tanque se contabilizó mediante la Ecuación 316.

$$\begin{aligned} & \frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} \\ & \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión } \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}}\right) * \text{horas de funcionamiento } \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}}\right)}{\text{producción total de azúcar } \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}}\right)} \\ & = \frac{\text{Eficiencia del motor}}{\text{Eficiencia del motor}} \end{aligned}$$

Ecuación 316

Los insumos utilizados durante el mantenimiento del tanque de jugo mezclado se representan en las Ecuación 317 - Ecuación 318.

$$\frac{\text{tornillos}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de aceite (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 317

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 318

El transporte que representó cada insumo se observa en las Ecuación 319 - Ecuación 320.

$$\frac{\text{tornillos transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 319

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 320

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 321 - Ecuación 324. En ella se relaciona la cantidad de insumo consumido y un factor de emisión vinculado a los gases generados.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 321

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 322

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 323

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 324

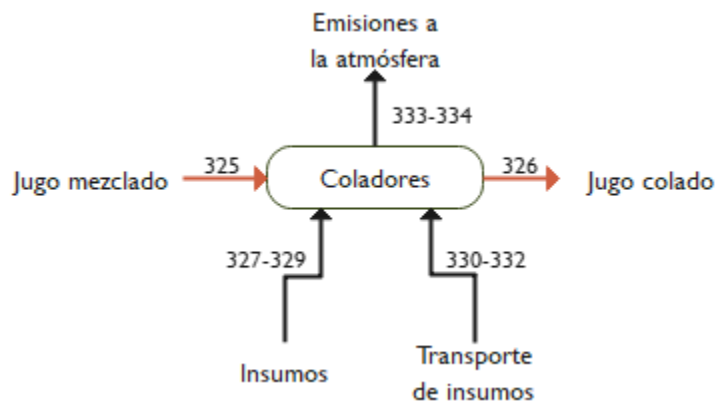


Figura 72. Flujos de entrada y salida en los coladores
Fuente: Elaboración propia

El jugo mezclado que atraviesa los coladores proviene del tanque de jugo mezclado, por lo que son iguales. Dicha equivalencia se muestra en la Ecuación 325.

$$\frac{\text{jugo de mezclado entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo de mezclado salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 325

De igual manera, la misma cantidad de jugo mezclado que entra, es la que sale de coladores. Por lo tanto, en la Ecuación 326 se muestra la igualdad.

$$\frac{\text{jugo colado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo de mezclado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 326

Los insumos utilizados en los coladores se calcularon con las Ecuación 327 - Ecuación 329.

$$\frac{\text{tornillos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de tornillos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 327

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 328

$$\frac{\text{oxígeno (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de oxígeno (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 329

A su vez, por el respectivo transporte:

$$\frac{\text{tornillos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 330

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 331

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno transportado (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 332

La cantidad de emisiones se estimaron con las ecuaciones Ecuación 333 y Ecuación 334:

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 333

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 334

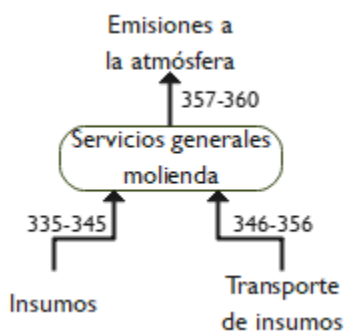


Figura 73. Flujos de entrada y salida de los servicios en general en molienda
Fuente: Elaboración propia

El resto de los insumos que no se contabilizaron para los equipos en específicos se muestran a continuación de las ecuaciones Ecuación 335 a la Ecuación 345.

$$\frac{\text{placa de acero (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de placa de acero (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 335

$$\frac{\text{tornillos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de tornillos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 336

$$\frac{\text{grasa (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de grasa(ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 337

$$\frac{\text{arandela (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de arandelas(ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 338

$$\frac{\text{aceites (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de aceites (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 339

$$\frac{\text{cinchos (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de cinchos (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 340

$$\frac{\text{solera (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de solera (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 341

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 342

$$\frac{\text{oxígeno (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de oxígeno (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 343

$$\frac{\text{gas LP (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de gas LP (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 344

$$\frac{\text{óxido de calcio (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{óxido de calcio (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 345

A su vez, por el respectivo transporte:

$$\frac{\text{placas de acero transportadas (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{placas de acero adquiridas (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 346

$$\frac{\text{tornillos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 347

$$\frac{\text{grasa transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{grasa adquiridas (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 348

$$\frac{\text{arandelas transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{arandelas adquiridas (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 349

$$\frac{\text{aceites transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{aceites adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 350

$$\frac{\text{cinchos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cinchos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 351

$$\frac{\text{solera transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{solera adquirida (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 352

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 353

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno transportado (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 354

$$\frac{\text{gas LP transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{gas LP adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 355

$$\frac{\text{óxido de calcio transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{óxido de calcio adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 356

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 357 - Ecuación 360. En ella se relaciona la cantidad de insumo consumido y un factor de emisión vinculado a los gases generados.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 357

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 358

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 359

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 360

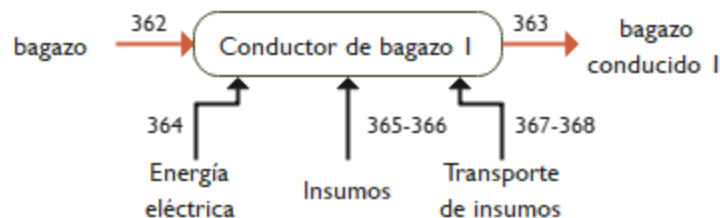


Figura 74. Flujos de entrada y salida del conductor de bagazo I

Fuente: Elaboración propia

La cantidad de bagazo que se conduce por el conductor de bagazo 1 es la cantidad que sale del molino 5, por lo tanto, dicha igualdad se respalda en la Ecuación 361.

$$\frac{\text{bagazo de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{bagazo de salida molino 5 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 361

Dado que la cantidad de bagazo que circula por el conductor 1 es la misma cantidad que sale del dispositivo, la cantidad de bagazo que entra es igual a la que sale, por lo tanto.

$$\frac{\text{bagazo de salida (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{bagazo de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 362

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del conductor de bagazo 1 se contabilizó mediante la Ecuación 363.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 363

Los materiales utilizados para el mantenimiento del conductor de bagazo 1 se calcularon con las ecuaciones Ecuación 364 y Ecuación 365.

$$\frac{\text{tornillos}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de tornillos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 364

$$\frac{\text{solera}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de solera (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 365

El transporte correspondiente a dicha distribución de los insumos anteriores, se estimaron con las ecuaciones Ecuación 366 y Ecuación 367.

$$\frac{\text{tornillos transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 366

$$\frac{\text{solera transportada (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{solera total adquirida (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 367

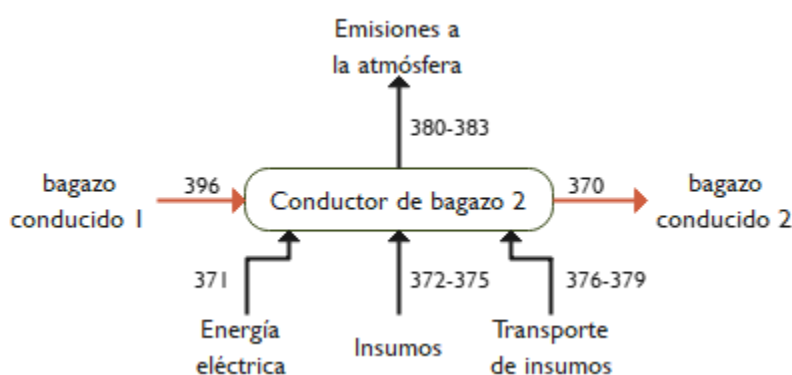


Figura 75. Flujos de entrada y salida del conductor 2 de bagazo
Fuente: Elaboración propia

La cantidad de bagazo que sale del conductor de bagazo 1 es la cantidad que entra al conductor de bagazo 2, por lo tanto.

$$\frac{\text{bagazo salida conductor 1 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{bagazo entrada conductor 2 (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 368

Dado que la cantidad de bagazo que circula por el conductor 2 es la misma cantidad que sale del dispositivo, la cantidad de bagazo que entra es igual a la que sale, por lo tanto.

$$\frac{\text{bagazo de salida (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{bagazo de entrada (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 369

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del conductor de bagazo 2 se contabilizó mediante la Ecuación 370.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión } \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}}\right) * \text{horas de funcionamiento } \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}}\right)}{\frac{\text{producción total de azúcar } \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}}\right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 370

Los materiales utilizados para el mantenimiento del conductor de bagazo 1 se calcularon con las ecuaciones Ecuación 371 y Ecuación 374.

$$\frac{\text{arandelas}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de arandelas (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 371

$$\frac{\text{tornillos}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de tornillos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 372

$$\frac{\text{solera}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de solera (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 373

$$\frac{\text{electrodos}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 374

El transporte correspondiente a dicha distribución de los insumos anteriores, se estimaron con las ecuaciones Ecuación 375 y Ecuación 378.

$$\frac{\text{arandelas transportadas (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{arandelas totales adquirids (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 375

$$\frac{\text{tornillos transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 376

$$\frac{\text{solera transportada (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{solera total adquirida (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 377

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 378

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 379 - Ecuación 381. En ella se relaciona la cantidad de insumo consumido y un factor de emisión vinculado a los gases generados.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 379

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 380

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 381

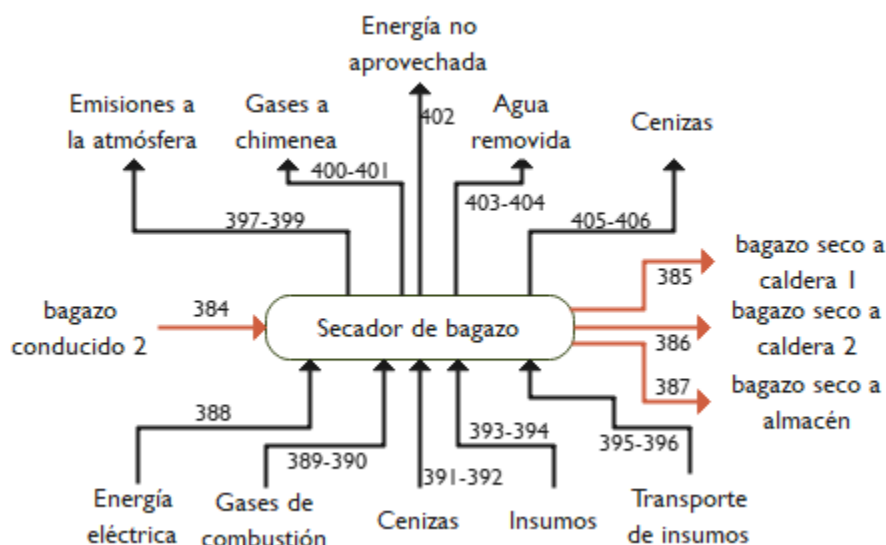


Figura 76. Flujos de entrada y salida del secador de bagazo
Fuente: Elaboración propia

La cantidad de bagazo que entra al secador es la misma cantidad que sale del conductor de caña 2, por lo tanto:

$$\frac{\text{bagazo conducido 2 de salida (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{bagazo de entrada a secador (g)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 382

La cantidad de bagazo que se dirige a la caldera 1 se calculó a través de un factor de consumo relacionado con la cantidad de vapor generado por cada caldera, multiplicado por el total de bagazo seco y la capacidad calorífica del bagazo a la humedad después del secado. En la Ecuación 383 se muestra dicha operación.

$$\frac{\text{bagazo a caldera 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{producción vapor 1} \frac{\text{bagazo seco + humedad (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} * C_{p\text{bagazo}} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{g}} \right)$$

Ecuación 383

$$\frac{\text{bagazo a caldera 2 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{producción vapor 2} \frac{\text{bagazo seco + humedad (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} * C_{p\text{bagazo}} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{g}} \right)$$

Ecuación 384

La cantidad de bagazo que se almacena se calculó mediante la Ecuación 385. Esta representa la cantidad total de energía disponible y la cantidad utilizada. Las cantidades particulares de cada caso se calculan en la etapa de caldera 1 y caldera 2.

$$\frac{\text{bagazo a almacén (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Energía producida} - \text{energía utilizada}}{g} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{g}} \right)$$

Ecuación 385

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del secador de bagazo se contabilizó mediante la Ecuación 386.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 386

La cantidad de energía térmica contenida en los gases es la misma cantidad que sale del intercambiador de calor 1, por lo tanto.

$$\frac{\text{Energía térmica en gases 1}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Energía térmica en gases de interc. 1}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 387

$$\frac{\text{Energía térmica en gases 2}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Energía térmica en gases de interc. 2}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 388

La cantidad de cenizas que entran al secador se representan mediante las ecuaciones Ecuación 389 y Ecuación 390.

$$\frac{\text{Ceniza de entrada 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Ceniza de salida de intercambiador 1}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 389

$$\frac{\text{Ceniza de entrada 2 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Ceniza de salida de intercambiador 2}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 390

La cantidad de insumos que se usaron en este dispositivo se calcularon con las ecuaciones Ecuación 391 y ecuación 392.

$$\frac{\text{tornillos}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de tornillos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 391

$$\frac{\text{electrodos}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

ecuación 392

El transporte fue calculado con las ecuaciones Ecuación 393 y Ecuación 394.

$$\frac{\text{tornillos transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 393

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 394

La cantidad de emisiones por uso de electrodos se calcularon con las ecuaciones Ecuación 395 a Ecuación 397.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 395

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 396

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 397

La energía que sale a gases de chimenea se calculó con las ecuaciones Ecuación 398 y Ecuación 399.

$$\frac{\text{Energía de salida 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Energía entrante en gas} - \text{Energía para secado} - \text{Energía para evaporación de agua} - \text{Energía no aprovechada}}{\text{producción azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 398}$$

$$\frac{\text{Energía de salida 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Energía entrante en gas} - \text{Energía para secado} - \text{Energía para evaporación de agua} - \text{Energía no aprovechada}}{\text{producción azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 399}$$

La pérdida de energía por eficiencia del dispositivo se estimó a través de un porcentaje de pérdida de la energía total de entrada.

$$\frac{\text{Energía perdida}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{pérdida} \left(\frac{\text{Energía térmica en gases de interc. 1}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Energía térmica en gases de interc. 2}}{\text{producción azúcar (g)}} \right) \quad \text{Ecuación 400}$$

La cantidad de agua que se removió mediante evaporación se estimó con la siguiente ecuación que representa la eficiencia del actual secador por la cantidad total de bagazo que entra.

$$\frac{\text{Agua removida 1}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{bagazo húmedo de entrada} - \text{bagazo base seca} * \% \text{ humedad de salida}}{\text{producción azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 401}$$

$$\frac{\text{Agua removida 2}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{bagazo húmedo de entrada} - \text{bagazo base seca} * \% \text{ humedad de salida}}{\text{producción azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 402}$$

La cantidad de ceniza que sale del secador hacia la chimenea es la misma cantidad que entra del intercambiador 1, por lo tanto.

$$\frac{\text{Ceniza de entrada 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Ceniza de salida de intercambiador 1}}{\text{producción azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 403}$$

$$\frac{\text{Ceniza de entrada 2 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Ceniza de salida de intercambiador 2}}{\text{producción azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 404}$$

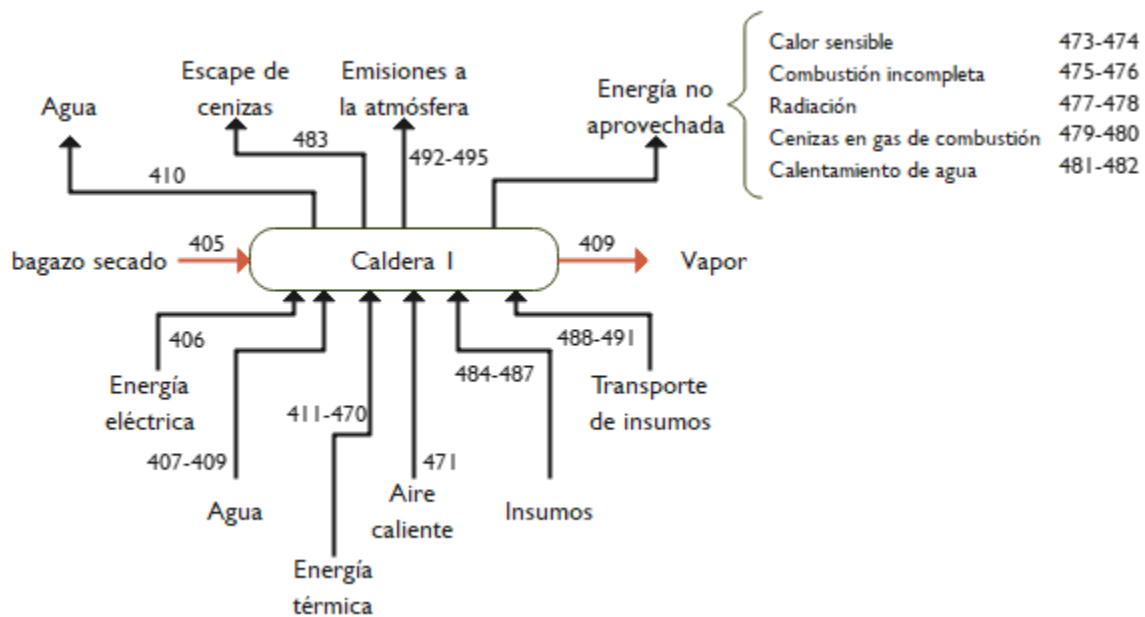


Figura 77. Flujos de entrada y salida de la caldera I
Fuente: Elaboración propia

La cantidad de bagazo que entra a la caldera 1 se calculó con la ecuación Ecuación 405.

$$\frac{\text{bagazo seco 1 entrada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{bagazo a caldera 1 salida (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 405

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de la caldera se contabilizó mediante la Ecuación 406.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión } \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}}\right) * \text{horas de funcionamiento } \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}}\right)}{\frac{\text{producción total de azúcar } \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}}\right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 406

La cantidad de agua requerida para generar vapor se calculó con:

$$\frac{\text{Agua de entrada para vapor (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{vapor generado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{agua de reposición}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 407

Agua de reposición se calculó con la Ecuación 408.

$$\frac{\text{Agua de reposición (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua total para caldera l(ton)} * \frac{1}{1 - \% \text{ pérdida de agua}}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 408

Agua para tratamiento se estimó con la Ecuación 409

$$\frac{\text{Agua para tratamiento (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\% \text{ agua reposición} * \text{agua para vapor (ton)} * \frac{1}{\% \text{ agua para vapor}}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 409

El agua no aprovechada se calculó con la Ecuación 410.

$$\frac{\text{Agua perdida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Agua de entrada para vapor (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Agua de reposición (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 410

Análisis de la composición del bagazo base seca

Debido a la simplificación de los cálculos respecto al balance de masa del bagazo, se utilizará los resultados del análisis de laboratorio, obtenidos en base seca. Para conocer la masa molar del bagazo seco sin ceniza, se calcula con las ecuaciones Ecuación 411 y Ecuación 412:

$$m_{bs} = M_O * X + M_H * Y + M_O * Z$$

Ecuación 411

$$m_{bh} = \frac{m_{bs}}{1 - A - C * (1 - A)}$$

Ecuación 412

Donde:

$$m_{bs} = \text{masa molar de bagazo seco sin ceniza} \left(\frac{\text{kg de bagazo base seca sin ceniza}}{\text{kmol de bagazo seco sin ceniza}} \right)$$

$$m_{bh} = \text{masa de bagazo húmedo por kmol de bagazo seco sin ceniza} \left(\frac{\text{kg de bagazo húmedo}}{\text{kmol de bagazo seco sin ceniza}} \right)$$

$$A = \text{humedad por kmol de bagazo seco sin ceniza} \left(\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de bagazo seco}} \right)$$

Para calcular m_{bs} y m_{bh} fue necesario plantear el bagazo en su expresión química a partir de los resultados de laboratorio mostrados en la Tabla 156:

Tabla 156. Caracterización del bagazo de caña, base seca.	
Elemento (E_{bs})	Porcentaje
C	43.90
H ₂	6.85
S	0
O ₂	44.30
N ₂	0.30
H ₂ O	0
Cenizas	4.65
Total	100

Para conocer los subíndices correspondientes a la caracterización del bagazo, se plantearon las ecuaciones Ecuación 413 a Ecuación 416.



Ecuación 413

$$12.011X = 43.9$$

Ecuación 414

$$1.0079Y = 6.85$$

Ecuación 415

$$16Z = 44.3$$

Ecuación 416

Por lo tanto, se puede calcular la masa con la Ecuación 412

$$m_{bs} = M_O * X + M_H * Y + M_C * Z$$

Donde:

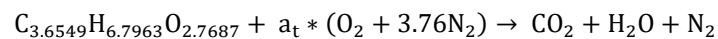
$$M_O = \text{masa molar de O} \left(\frac{\text{kg O}}{\text{kmol agazo}} \right)$$

$$M_H = \text{masa molar de H} \left(\frac{\text{kg H}}{\text{kmol agazo}} \right)$$

$$M_C = \text{masa molar de C} \left(\frac{\text{kg C}}{\text{kmol}} \right)$$

Balance de masa en la combustión

Uno de los primeros pasos para realizar el balance de masa en la combustión, es plantear el balance de ecuación química de combustión completa sin exceso de aire, para ello se plantea la reacción química sin balancear (Ecuación 417).

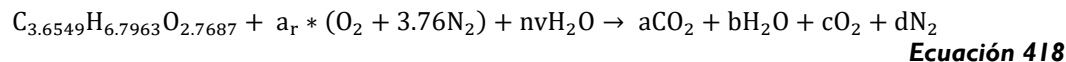


Ecuación 417

Donde:

$$a_t = \text{aire teórico} = \frac{\text{kmol O}_2}{\text{kmol bagazo seco sin ceniza}}$$

Por otra parte, debe ser considerada la combustión completa con exceso de aire y humedad presente, por lo que la Ecuación 417.



Donde:

$$a_r = \text{aire requerido} = a_t * (1 + \text{exceso de aire})$$

Ecuación 419

$$n_v = n_a * \bar{X}_{\text{vapor}} = \text{no. de moles de vapor de agua presentes en el aire}$$

Ecuación 420

n_a = no. de moles de aire seco presentes en la combustión
 \bar{X}_{vapor} = fracción molar de vapor de agua

$$a = X$$

Ecuación 421

$$b = \frac{Y}{2} + n_v$$

Ecuación 422

$$c = \frac{2 * a_r + Z + n_v - b - 2 * a}{2}$$

Ecuación 423

$$d = 3.76 * a_r$$

Ecuación 424

Como se puede observar, es necesario el cálculo de n_a y \bar{X}_{vapor} , los cuáles se obtienen mediante las ecuaciones 12-14.

$$\bar{X}_{\text{vapor}} = \frac{P_v}{P_{\text{atm}} - P_v}$$

Ecuación 425

$$P_v = \phi * P_{\text{sat}}$$

Ecuación 426

$$P_{\text{sat}} = e^{\left[\left(\frac{0.01}{T_{\text{ap}}} \right) (647.31 - T_{\text{ap}}) \sum_{i=1}^8 (F_i) (0.65 - 0.01 * (T_{\text{ap}} - 273.15))^{i-1} \right] (221.077)}$$

Ecuación 427

Donde:

T_{ap} = temperatura ambiente de entrada de aire primario = 298.15 K

ϕ = humedad relativa presente en el aire atmosférico = 41%

$F_1 = -741.9242$

$F_2 = -29.7210$

$F_3 = -11.55286$

$F_4 = -0.08685635$

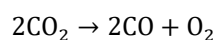
$F_6 = 0.1094098$

$F_6 = 0.439993$

$F_7 = 0.250658$

$F_8 = 0.05218684$

Además, hay que considerar la combustión incompleta, por lo que se introduce la fórmula química 4:



Ecuación 428

Y seleccionando los productos de la fórmula química 4, para obtener la fórmula química 5.



Ecuación 429

Donde:

$$ei = \frac{\bar{X}_{CO} * (d + a + c)}{1 - \frac{\bar{X}_{CO}}{2}}$$

Ecuación 430

$$ai = a - ei$$

Ecuación 431

$$bi = b$$

Ecuación 432

$$ci = c + \frac{ei}{2}$$

Ecuación 433

$$di = d$$

Ecuación 434

A partir de los resultados anteriores, se calculó la masa y el volumen de los gases de combustión formados por cada kg de bagazo, a través de las siguientes ecuaciones:

$$CO = ei * \left(\frac{M_{CO}}{M_{bh}} \right)$$

Ecuación 435

$$CO_2 = ai * \left(\frac{M_{CO_2}}{M_{bh}} \right)$$

Ecuación 436

$$H_2O = bi * \left(\frac{M_{H_2O}}{M_{bh}} \right) + A$$

Ecuación 437

$$O_2 = ci * \left(\frac{M_{O_2}}{M_{bh}} \right)$$

Ecuación 438

$$N_2 = di * \left(\frac{M_{N_2}}{M_{bh}} \right)$$

Ecuación 439

Definiendo cada término y unidades:

CO = masa de CO generada por kg de bagazo $\left(\frac{\text{kg } CO}{\text{kg de bagazo}} \right)$

CO_2 = masa de CO_2 generada por kg bagazo $\left(\frac{\text{kg } CO_2}{\text{kg de bagazo}} \right)$

H_2O = masa de H_2O generada por cada kg de bagazo $\left(\frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg de bagazo}} \right)$

O_2 = masa de O_2 generada por kg de bagazo $\left(\frac{\text{kg } O_2}{\text{kg de bagazo}} \right)$

N_2 = masa de N_2 generada por kg de bagazo $\left(\frac{\text{kg } N_2}{\text{kg de bagazo}} \right)$

M_{CO} = masa molar de CO $\left(\frac{\text{kg } CO}{\text{kmol bagazo}} \right)$

M_{CO_2} = masa molar de CO_2 $\left(\frac{\text{kg } CO_2}{\text{kmol bagazo}} \right)$

M_{H_2O} = masa molar de H_2O $\left(\frac{\text{kg } H_2O}{\text{kmol bagazo}} \right)$

M_{O_2} = masa molar de O_2 $\left(\frac{\text{kg } O_2}{\text{kmol bagazo}} \right)$

M_{N_2} = masa molar de N_2 $\left(\frac{\text{kg } N_2}{\text{kmol bagazo}} \right)$

En la Tabla 157 se muestra el valor de la masa molar por elemento, así como la densidad a condiciones normales.

Tabla 157. Masa molar y densidad de los productos de combustión del bagazo		
Elemento	Masa molar $\frac{\text{kg elemento}}{\text{kmol}}$	Densidad $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
CO	28	1184
CO_2	44.01	1976
H_2O	18	997

O_2	16	1429
N_2	28	1250

Para calcular el volumen generado, se calculó con las ecuaciones Ecuación 440 a Ecuación 444.

$$[CO] = \left(\frac{CO}{\rho_{CO}} \right) \quad \text{Ecuación 440}$$

$$[CO_2] = \left(\frac{CO_2}{\rho_{CO_2}} \right) \quad \text{Ecuación 441}$$

$$[H_2O] = \left(\frac{H_2O}{\rho_{H_2O}} \right) \quad \text{Ecuación 442}$$

$$[O_2] = \left(\frac{O_2}{\rho_{O_2}} \right) \quad \text{Ecuación 443}$$

$$[N_2] = \left(\frac{N_2}{\rho_{N_2}} \right) \quad \text{Ecuación 444}$$

$$\begin{aligned}
[CO] &= \text{volumen de CO generado por kg de bagazo} \left(\frac{Nm^3 CO}{kg \text{ de bagazo}} \right) \\
[CO_2] &= \text{volumen de CO}_2 \text{ generado por kg de bagazo} \left(\frac{Nm^3 CO_2}{kg \text{ de bagazo}} \right) \\
[H_2O] &= \text{volumen de H}_2O \text{ generado por kg de bagazo} \left(\frac{Nm^3 H_2O}{kg \text{ de bagazo}} \right) \\
[O_2] &= \text{volumen de O}_2 \text{ generado por kg de bagazo} \left(\frac{Nm^3 O_2}{kg \text{ de bagazo}} \right) \\
[N_2] &= \text{volumen de N}_2 \text{ generado por kg de bagazo} \left(\frac{Nm^3 N_2}{kg \text{ de bagazo}} \right)
\end{aligned}$$

Además, es necesario calcular la relación de la masa de gases de combustión total y la relación del volumen total generado con las ecuaciones Ecuación 445 y Ecuación 446.

$$G_m = CO + CO_2 + H_2O + O_2 + N_2 \quad \text{Ecuación 445}$$

$$G_v = [CO] + [CO_2] + [H_2O] + [O_2] + [N_2] \quad \text{Ecuación 446}$$

Para calcular las fracciones molares de los gases de combustión, se obtienen con:

$$\bar{X}_{\text{CO}} = \frac{[\text{CO}]}{G_v}$$

Ecuación 447

$$\bar{X}_{\text{CO}_2} = \frac{[\text{CO}_2]}{G_v}$$

Ecuación 448

$$\bar{X}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{[\text{H}_2\text{O}]}{G_v}$$

Ecuación 449

$$\bar{X}_{\text{O}_2} = \frac{[\text{O}_2]}{G_v}$$

Ecuación 450

$$\bar{X}_{\text{N}_2} = \frac{[\text{N}_2]}{G_v}$$

Ecuación 451

Balance de energía

Para calcular los niveles de energía de cada flujo, se realiza un promedio con las ecuaciones Ecuación 452 a Ecuación 455 de los coeficientes de entalpía de gases de combustión A, B, C y D de la Tabla 158.

Tabla 158. Coeficientes de entalpía de los gases de combustión				
Gas	A	B	C	D
CO	28.16	0.001675	5.37E-06	-2.22E-09
CO ₂	22.26	0.0581	-3.50E-05	7.47E-09
H ₂ O	32.34	0.001923	-1.06E-05	-3.60E-09
O ₂	25.48	0.0152	-7.16E-06	1.31E-09
N ₂	28.9	-1.57E-03	8.08E-06	-2.87E-09

$$A_{\text{prom}} = \bar{X}_{\text{CO}} * A_{\text{CO}} + \bar{X}_{\text{CO}_2} * A_{\text{CO}_2} + \bar{X}_{\text{H}_2\text{O}} * A_{\text{H}_2\text{O}} + \bar{X}_{\text{O}_2} * A_{\text{O}_2} + \bar{X}_{\text{N}_2} * A_{\text{N}_2}$$

Ecuación 452

$$B_{\text{prom}} = \bar{X}_{\text{CO}} * B_{\text{CO}} + \bar{X}_{\text{CO}_2} * B_{\text{CO}_2} + \bar{X}_{\text{H}_2\text{O}} * B_{\text{H}_2\text{O}} + \bar{X}_{\text{O}_2} * B_{\text{O}_2} + \bar{X}_{\text{N}_2} * B_{\text{N}_2}$$

Ecuación 453

$$C_{\text{prom}} = \bar{X}_{\text{CO}} * C_{\text{CO}} + \bar{X}_{\text{CO}_2} * C_{\text{CO}_2} + \bar{X}_{\text{H}_2\text{O}} * C_{\text{H}_2\text{O}} + \bar{X}_{\text{O}_2} * C_{\text{O}_2} + \bar{X}_{\text{N}_2} * C_{\text{N}_2}$$

Ecuación 454

$$D_{\text{prom}} = \bar{X}_{\text{CO}} * D_{\text{CO}} + \bar{X}_{\text{CO}_2} * D_{\text{CO}_2} + \bar{X}_{\text{H}_2\text{O}} * D_{\text{H}_2\text{O}} + \bar{X}_{\text{O}_2} * D_{\text{O}_2} + \bar{X}_{\text{N}_2} * D_{\text{N}_2}$$

Ecuación 455

Por otra parte, se requieren las entalpías molares a la temperatura de salida de los gases de combustión de la chimenea y a una temperatura de referencia. A continuación, se muestran las ecuaciones utilizadas para el cálculo de cada una (Ecuación 456 - Ecuación 465).

$$h_{CO\ TSC} = A_{CO} * T_{SC} + B_{CO} * \frac{T_{SC}^2}{2} + C_{CO} * \frac{T_{SC}^3}{3} + D_{CO} * \frac{T_{SC}^4}{4}$$

Ecuación 456

$$h_{CO_2\ TSC} = A_{CO_2} * T_{SC} + B_{CO_2} * \frac{T_{SC}^2}{2} + C_{CO_2} * \frac{T_{SC}^3}{3} + D_{CO_2} * \frac{T_{SC}^4}{4}$$

Ecuación 457

$$h_{H_2O\ TSC} = A_{H_2O} * T_{SC} + B_{H_2O} * \frac{T_{SC}^2}{2} + C_{H_2O} * \frac{T_{SC}^3}{3} + D_{H_2O} * \frac{T_{SC}^4}{4}$$

Ecuación 458

$$h_{O_2\ TSC} = A_{O_2} * T_{SC} + B_{O_2} * \frac{T_{SC}^2}{2} + C_{O_2} * \frac{T_{SC}^3}{3} + D_{O_2} * \frac{T_{SC}^4}{4}$$

Ecuación 459

$$h_{N_2\ TSC} = A_{N_2} * T_{SC} + B_{N_2} * \frac{T_{SC}^2}{2} + C_{N_2} * \frac{T_{SC}^3}{3} + D_{N_2} * \frac{T_{SC}^4}{4}$$

Ecuación 460

$$h_{CO\ Tref} = A_{CO} * T_{ref} + B_{CO} * \frac{T_{ref}^2}{2} + C_{CO} * \frac{T_{ref}^3}{3} + D_{CO} * \frac{T_{ref}^4}{4}$$

Ecuación 461

$$h_{CO_2\ Tref} = A_{CO_2} * T_{ref} + B_{CO_2} * \frac{T_{ref}^2}{2} + C_{CO_2} * \frac{T_{ref}^3}{3} + D_{CO_2} * \frac{T_{ref}^4}{4}$$

Ecuación 462

$$h_{H_2O\ Tref} = A_{H_2O} * T_{ref} + B_{H_2O} * \frac{T_{ref}^2}{2} + C_{H_2O} * \frac{T_{ref}^3}{3} + D_{H_2O} * \frac{T_{ref}^4}{4}$$

Ecuación 463

$$h_{O_2\ Tref} = A_{O_2} * T_{ref} + B_{O_2} * \frac{T_{ref}^2}{2} + C_{O_2} * \frac{T_{ref}^3}{3} + D_{O_2} * \frac{T_{ref}^4}{4}$$

Ecuación 464

$$h_{N_2\ Tref} = A_{N_2} * T_{ref} + B_{N_2} * \frac{T_{ref}^2}{2} + C_{N_2} * \frac{T_{ref}^3}{3} + D_{N_2} * \frac{T_{ref}^4}{4}$$

Ecuación 465

Para calcular la entalpía del gas de combustión a la temperatura de la salida de la chimenea y la temperatura de referencia, se utiliza la ecuación

$$h_{g \text{ TSC}} = \frac{h_{\text{CO TSC}} * \bar{X}_{\text{CO}} + h_{\text{CO}_2 \text{ TSC}} * \bar{X}_{\text{CO}_2} + h_{\text{H}_2\text{O TSC}} * \bar{X}_{\text{H}_2\text{O}} + h_{\text{O}_2 \text{ TSC}} * \bar{X}_{\text{O}_2} + h_{\text{N}_2 \text{ TSC}} * \bar{X}_{\text{N}_2}}{M_g}$$

Ecuación 466

$$h_{g \text{ ref}} = \frac{h_{\text{CO Tref}} * \bar{X}_{\text{CO}} + h_{\text{CO}_2 \text{ Tref}} * \bar{X}_{\text{CO}_2} + h_{\text{H}_2\text{O Tref}} * \bar{X}_{\text{H}_2\text{O}} + h_{\text{O}_2 \text{ Tref}} * \bar{X}_{\text{O}_2} + h_{\text{N}_2 \text{ Tref}} * \bar{X}_{\text{N}_2}}{M_g}$$

Ecuación 467

Donde:

$$M_g = \bar{X}_{\text{CO}} * M_{\text{CO}} + \bar{X}_{\text{CO}_2} * M_{\text{CO}_2} + \bar{X}_{\text{H}_2\text{O}} * M_{\text{H}_2\text{O}} + \bar{X}_{\text{O}_2} * M_{\text{O}_2} + \bar{X}_{\text{N}_2} * M_{\text{N}_2}$$

Ecuación 468

Energía por unidad de masa liberada en la combustión

La energía que se libera por la cantidad de masa utilizada en la combustión se expresa por el poder calorífico inferior del combustible. Varía principalmente por la humedad que aporta y está dada por la Ecuación 469:

$$q_i = \text{PCI} = (4250 - 4850 \times W) \times 4.1858 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

Ecuación 469

$$\frac{\text{Energía aportada por bagazo (MJ)}}{\text{producción de azúcar}} = \frac{\text{Bagazo total de entrada (ton)} * C_{p_{\text{bagazo}}} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}^\circ\text{C}} \right) * (T_{\text{eB}} - T_{\text{a}} (^\circ\text{C}))}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 470

Donde:

$$q_i = \text{PCI} = \text{poder calorífico inferior}$$

$$W = \text{contenido de humedad}$$

Energía aportada por el aire de entrada

La energía aportada por el aire caliente de entrada está dada por la Ecuación 471. Está en función de términos de la relación aire/combustible.

$$q_{\text{ap}} = \left(c_{\text{pa}} \left(\frac{a_r (M_{\text{O}_2} + 3.76 M_{\text{N}_2})}{M_{\text{bh}}} \right) + c_{\text{pv}} \left(\frac{n_v M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{bh}}} \right) \right) (T_{\text{ap}} - T_{\text{ref}}) \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

Ecuación 471

Donde:

T_{ap} = temperatura de entrada de aire primario (K)

T_{ref} = temperatura de referencia (K)

c_{pa} = calor específico a presión constante del aire de entrada $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right)$

c_{pv} = Calor específico a presión constante del vapor de agua en el aire $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right)$

$$\frac{\text{energía por aire caliente}}{\text{producción de azúcar}} = \frac{q_{ap} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right) * \text{bagazo consumido en caldera 1 (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 472

Pérdida de energía por calor sensible en gases de combustión

La pérdida de energía que sale en los gases de combustión en forma de calor sensible se calculó con la Ecuación 473:

$$q_{ch} = G_m (h_{g, ch} - h_{g, ref}) \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

Ecuación 473

$$\frac{\text{Energía no aprovechada en gases de combustión (MJ)}}{\text{producción de azúcar}} = \frac{\text{gases generados en caldera 1 (ton)} * \left(h_{g, TSC} - h_{g, ref} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}}\right)\right)}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 474

Donde:

G_m = relación másica de gases de combustión y combustible $\left(\frac{\text{kg gases de combustión}}{\text{kg de bagazo}}\right)$

$h_{g, ch}$ = entalpía de los gases de combustión $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$

$h_{g, ref}$ = entalpía de los gases de combustión a la temperatura de referencia $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$

Pérdida de energía por combustión incompleta

La pérdida de energía debido a la combustión incompleta ocurre cuando no se libera completamente la energía del combustible durante la combustión debido a la formación de monóxido de carbono (CO) en lugar de dióxido de carbono (CO₂). Esto se debe a que el monóxido de carbono libera menos energía en la reacción de combustión en comparación con el dióxido de carbono y está dada por la Ecuación 475:

$$q_{ci} = [\text{CO}] * 12644 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg de bagazo húmedo}}\right)$$

Ecuación 475

$$\frac{\text{Energía no aprovechada por combustión incompleta (MJ)}}{\text{producción de azúcar}} = \frac{\text{CO total generado (ton)} * 12644 \text{ (MJ/ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 476

Pérdidas por radiación

Las pérdidas ocasionadas por la radiación (q_{rp}) surgen debido a la emisión de calor hacia el entorno externo de la caldera. Para simplificar los cálculos, se asume que todas las pérdidas de este tipo que ocurren en la superficie externa se concentran en un único lugar. Estas pérdidas dependen del flujo de calor aprovechable Q_a y del poder calorífico inferior del combustible PCI . Se pueden calcular utilizando la Ecuación 477.

$$q_{rp} = \frac{0.35 \times PCI}{\left(\frac{Q_a}{3600}\right)^{0.4}} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg de bagazo húmedo}}\right)$$

Ecuación 477

$$\frac{\text{Energía no aprovechada por radiación (MJ)}}{\text{producción de azúcar}} = \frac{q_{rp} \text{ total generado (MJ/ton bagazo)} * \text{total bagazo consumido (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 478

Pérdida por ceniza

Las pérdidas debidas a la ceniza (q_{cz}) son causadas por la porción del combustible que no se quema. Estas pérdidas están determinadas únicamente por la masa de ceniza C presente en el combustible en su forma seca y por el poder calorífico inferior del combustible. La ecuación se utiliza para calcular estas pérdidas (Ecuación 479).

$$q_{cz} = C \times PCI \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg de bagazo húmedo}}\right)$$

Ecuación 479

Las pérdidas de energía por calentamiento de agua se estimaron a través de las ecuaciones Ecuación 480 y Ecuación 481:

$$\frac{\text{Energía no aprovechada por cenizas (MJ)}}{\text{producción de azúcar}} = \frac{q_{cz} \text{ total generada (MJ/ton bagazo)} * \text{total bagazo consumido (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 480

$$\frac{\text{Energía para calentamiento de agua (MJ)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{Humedad bagazo} * \text{bagazo de entrada} * C_{\text{agua}} * (T_2 - T_1)}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 481

Para la evaporación del agua se utilizó la Ecuación 482

$$\frac{\text{Energía para evaporación de agua (MJ)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\% \text{humedad bagazo} * \text{bagazo seco (ton)} * c_{\text{lat agua}} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 482

Parte de la ceniza que se genera por la combustión del bagazo, se recupera en los hornos de la caldera, en la Ecuación 483 se representa dicha cantidad.

$$\frac{\text{Cenizas en horno de caldera 1 (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \% \text{cenizas recuperadas} * \frac{\text{Cenizas en horno de caldera 1 (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 483

Los insumos utilizados para la caldera 1 fueron los siguientes

$$\frac{\text{tornillos}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de tornillos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 484

$$\frac{\text{concreto}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de concreto (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 485

$$\frac{\text{electrodos}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 486

$$\frac{\text{oxígeno}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de oxígeno (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 487

Sus respectivos transportes están representados en las ecuaciones Ecuación 488 - Ecuación 491.

$$\frac{\text{tornillos transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 488

$$\frac{\text{concreto transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{concreto total adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 489

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 490

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno total adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 491

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 492 - Ecuación 495. En ella se relaciona la cantidad de insumo consumido y un factor de emisión vinculado a los gases generados.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 492

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 493

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 494

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 495

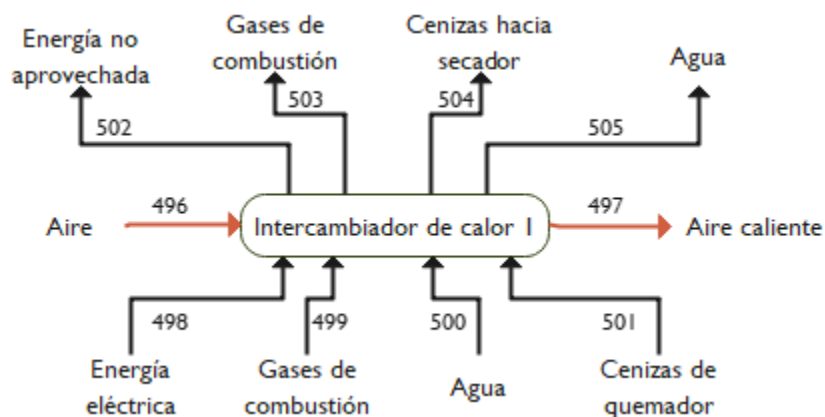


Figura 78. Flujos de entrada y salida del intercambiador I

Fuente: Elaboración propia

La cantidad de aire obtenida del medio ambiente se calculó con la Ecuación 496. Por lo tanto, en este caso, es la misma cantidad que entra al intercambiador de calor y será la misma cantidad que salga.

$$\frac{\text{Aire de entrada a intercambiador 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Aire de entrada requerido en caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 496}$$

La cantidad de aire caliente que sale del intercambiador se calculó mediante la Ecuación 497

$$\frac{\text{Aire caliente (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Aire de entrada requerido en caldera 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 497}$$

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del intercambiador 1 se contabilizó mediante la Ecuación 498.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}} \quad \text{Ecuación 498}$$

La cantidad de gases de combustión que entran al intercambiador 1 es la misma cantidad de gases que entra sale de la caldera 1, por lo tanto, en la Ecuación 499 se representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{Gases de combustión de entrada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{gases de combustión de salida caldera 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Aire caliente (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 499}$$

El agua que se remueve por el calentamiento y evaporación del agua se estimó de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Agua removida en bagazo entrante a intercambiador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Energía para calentamiento de agua (MJ)}}{\text{producción de azúcar (g)}} + \frac{\text{Energía para evaporación de agua (MJ)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 500

Las cenizas que permanecen en el flujo de los gases de combustión son resulta de la diferencia entre la cantidad teórica que se produce y la cantidad que se recupera en los hornos, por lo tanto:

$$\frac{\text{Ceniza en gases entrada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Energía no aprovechada por cenizas salida (MJ)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 501

Energía no aprovechada por pérdidas de energía al ambiente se estimó a través de un factor. En la Ecuación 502 se representa dicha operación.

$$\frac{\text{Energía no aprovechada en intercambiador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{ de pérdida} * \frac{\text{Gases de combustión de entrada (M)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 502

La cantidad de gases de combustión que salen del intercambiador después de calentar el aire se calculó mediante la ecuación:

$$\frac{\text{Gases de combustión de salida (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{gases de combustión de entrada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{energía no aprovechada en intercambiador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Energía por aire caliente}}{\text{producción de azúcar}}$$

Ecuación 503

La misma cantidad de cenizas que entran al intercambiador son las mismas que salen.

$$\frac{\text{Ceniza de salida en gases entrada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Ceniza en gases entrada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 504

La cantidad de agua removida desde el calentamiento del bagazo en las calderas sigue siendo la misma que sale del intercambiador 1, por lo que:

$$\frac{\text{Agua removida salida (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Agua removida en bagazo de entrada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 505

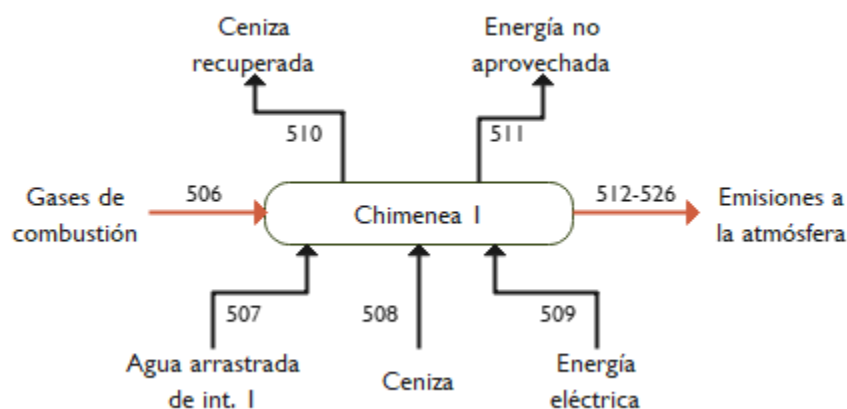


Figura 79. Flujos de entrada y salida de la chimenea I

Fuente: Elaboración propia

La cantidad de gases de combustión que entran a la chimenea 1 es la misma cantidad que sale del intercambiador de calor 1, por lo tanto.

$$\frac{\text{Gases de combustión de entrada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Gases de combustión de salida (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 506

La cantidad de agua removida por el calentamiento del bagazo en la caldera 1, es la misma cantidad que sale del intercambiador de calor 1 y por lo tanto la misma cantidad que entra a la chimenea 1.

$$\frac{\text{Agua removida de entrada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Agua removida en bagazo saliente de intercambiador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 507

La cantidad de cenizas que entra a la chimenea es la misma cantidad que sale del intercambiador de calor 1, por lo tanto.

$$\frac{\text{Ceniza de entrada a chimenea 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Ceniza de salida en gases entrada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 508

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de la chimenea se contabilizó mediante la Ecuación 509.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión } \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}}\right) * \text{horas de funcionamiento } \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}}\right)}{\frac{\text{producción total de azúcar } \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}}\right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 509

La cantidad de cenizas que se recuperan en los colectores de partículas de las chimeneas se calcularon con la Ecuación 510.

$$\frac{\text{Ceniza recuperada en chimenea 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{recuperación} * \frac{\text{bagazo consumido en caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 510

La energía no aprovechada que se emite por la chimenea 1 se calculó a través de la siguiente Ecuación 511.

$$\frac{\text{Energía no aprovechada 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Gases de combustión de salida (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 511

La composición del gas de combustión que se emitió a través de la chimenea se estimó mediante las siguientes ecuaciones.

$$\frac{\text{Emisión de SO}_2 \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} * \frac{\text{bagazo consumido en caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 512

$$\frac{\text{Emisión de NO}_x \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} * \frac{\text{bagazo consumido en caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 513

$$\frac{\text{Emisión de partículas (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} * \frac{\text{bagazo consumido en caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 514

$$\frac{\text{Emisión de CO (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} * \frac{\text{bagazo consumido en caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 515

$$\frac{\text{Emisión de CO}_2 \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} * \frac{\text{bagazo consumido en caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 516

$$\frac{\text{Emisión de Al}_2\text{O}_3 \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} * \frac{\text{bagazo consumido en caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 517

$$\frac{\text{Emisión de SO}_3 \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} * \frac{\text{bagazo consumido en caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 518

$$\frac{\text{Emisión de MgO (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} * \frac{\text{bagazo consumido en caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 519

$$\frac{\text{Emisión de P}_3\text{O}_5 \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} * \frac{\text{bagazo consumido en caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 520

$$\frac{\text{Emisión de Fe}_2\text{O}_3 \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} * \frac{\text{bagazo consumido en caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 521

$$\frac{\text{Emisión de MnO (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} * \frac{\text{bagazo consumido en caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 522

$$\frac{\text{Emisión de Cl (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} * \frac{\text{bagazo consumido en caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 523

$$\frac{\text{Emisión de Zn (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} * \frac{\text{bagazo consumido en caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 524

La cantidad de agua emitida también se consideró.

$$\frac{\text{Agua removida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{bagazo húmedo de entrada a secador (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{bagazo seco de entrada a caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 525

La cantidad de ceniza emitida también se consideró.

$$\frac{\text{Ceniza emitida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Ceniza total de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{ceniza recuperada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 526

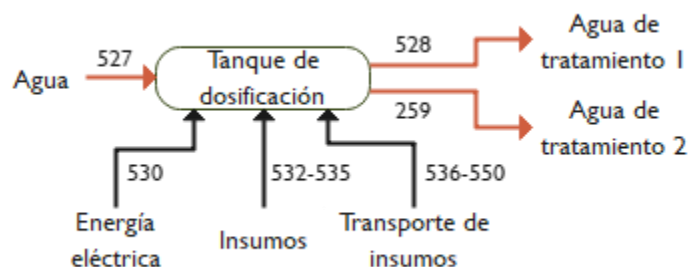


Figura 80. Flujos de entrada y salida del tanque de dosificación
Fuente: Elaboración propia

La cantidad de agua suministrada al tanque de dosificación fue la misma cantidad de agua que se solicitó para las calderas 1 y 2, por lo tanto.

$$\frac{\text{Agua de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Agua para tratamiento caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Agua para tratamiento caldera 2 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 527

Las cantidades de agua que salen del tanque de dosificación son las mismas que se consumen en las caldera 1 y 2, por lo tanto.

$$\frac{\text{Agua de tratamiento caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Agua para tratamiento caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 528

$$\frac{\text{Agua de tratamiento caldera 2 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Agua para tratamiento caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 529

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del tanque dosificación se contabilizó mediante la Ecuación 530.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión } \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}}\right) * \text{horas de funcionamiento } \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}}\right)}{\frac{\text{producción total de azúcar } \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}}\right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 530

Los insumos utilizados fueron los siguientes.

$$\frac{\text{arandelas (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de arandelas (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 531

Los insumos utilizados se calcularon con las ecuaciones Ecuación 532 a Ecuación 535.

$$\frac{\text{tornillos (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de tornillos (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 532

$$\frac{\text{antiespumante (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de antiespumante (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 533

$$\frac{\text{acondicionador de lodos (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de acondicionador de lodos (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 534

$$\frac{\text{sosa cáustica (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de sosa cáustica (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 535

El transporte de insumos se estimó con las ecuaciones Ecuación 536 a Ecuación 540.

$$\frac{\text{arandelas transportadas (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{arandelas totales adquiridas (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 536

$$\frac{\text{tornillos transportadas (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos totales adquiridas (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 537

$$\frac{\text{antiespumante transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{antiespumante total adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 538

$$\frac{\text{sosa cáustica transportada (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{sosa cáustica total adquirida (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 539

$$\frac{\text{acondicionador transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{acondicionador totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 540

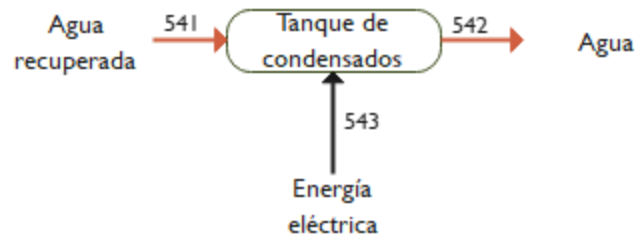


Figura 81. Flujos de entrada y salida del tanque de condensados

Fuente: Elaboración propia

La cantidad de agua que se recupera a través del tanque de condensados puros es una fracción del total de agua consumida por las calderas. En la Ecuación 541 se representa dicha igualdad.

$$\frac{\text{Agua recuperada (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \% \text{ recuperación de agua} * \frac{\text{agua para calderas}}{\text{producción de azúcar}}$$

Ecuación 541

La cantidad de agua de salida es la misma cantidad de agua que se recircula al sistema nuevamente. En la Ecuación 542 se representa dicha equivalencia.

$$\frac{\text{Agua recuperada de salida (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{Agua recuperada de entrada (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 542

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del tanque de condensados se contabilizó mediante la Ecuación 543.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 543

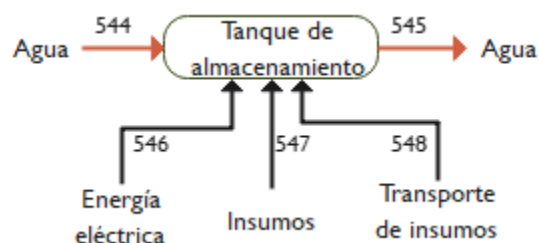


Figura 82. Flujos de entrada y salida del tanque de almacenamiento de agua
Fuente: Elaboración propia

La cantidad de agua que se almacena en el tanque se consideró con un porcentaje del agua total requerida para el proceso. En la Ecuación 545 se muestra dicho cálculo.

$$\frac{\text{Agua de entrada (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \% \text{ de almacenamiento} * \frac{\text{agua para calderas}}{\text{producción de azúcar}}$$

Ecuación 544

La misma cantidad que entra es la que se requiere para abastecer los requerimientos del agua para proceso.

$$\frac{\text{Agua de salida (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{Agua de entrada (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 545

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de la grúa se contabilizó mediante la Ecuación 546.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 546

El insumo se calculó con la Ecuación 547

$$\frac{\text{solera (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de solera (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 547

Su respectivo transporte con la Ecuación 548

$$\frac{\text{solera transportada (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{solera total adquirida (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 548

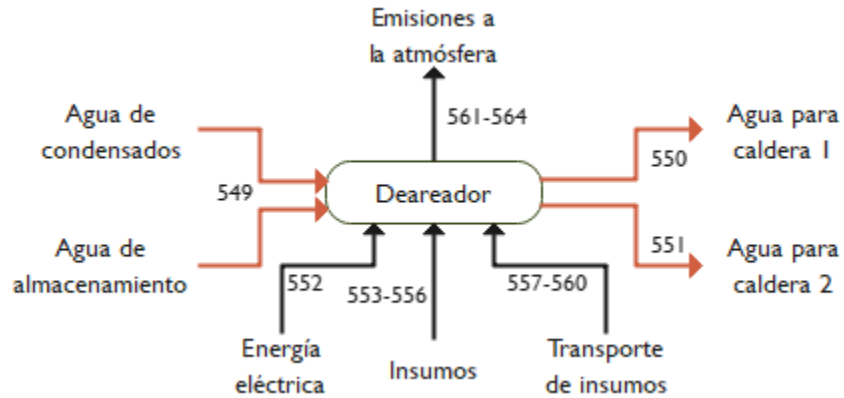


Figura 83. Flujos de entrada y salida del deareador

Fuente: Elaboración propia

Las cantidades de agua que entran al deareador son las mismas cantidades que salen del tanque de condensados puros y del tanque de almacenamiento. Por lo tanto:

$$\frac{\text{Agua de entrada (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{Agua de salida de condensados (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} + \frac{\text{Agua de salida de tanque almacenamiento (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 549

Las cantidades de agua que se dirigen hacia la caldera 1 y 2 se calcularon con las ecuaciones Ecuación 550 y Ecuación 551.

$$\frac{\text{Agua de salida caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Agua de entrada para vapor caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 550

$$\frac{\text{Agua de salida caldera 2 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Agua de entrada para vapor caldera 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 551

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del deareador se contabilizó mediante la Ecuación 552.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión } \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}}\right) * \text{horas de funcionamiento } \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}}\right)}{\frac{\text{producción total de azúcar } \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}}\right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 552

Los insumos que se utilizaron fueron

$$\frac{\text{arandelas (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de arandelas (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 553

$$\frac{\text{tornillos (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de tornillos (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 554

$$\frac{\text{electrodos (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de electrodos (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 555

$$\frac{\text{oxígeno (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de oxígeno (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 556

Transporte de insumos.

$$\frac{\text{arandelas transportadas (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{arandela total adquirida (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 557

$$\frac{\text{tornillos transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 558

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 559

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno total adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 560

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 561 - Ecuación 564. En ella se relaciona la cantidad de insumo consumido y un factor de emisión vinculado a los gases generados.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 561

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 562

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 563

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 564

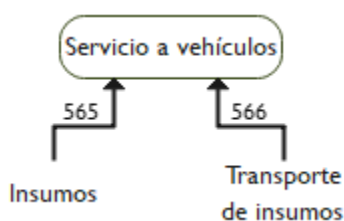


Figura 84. Flujos de entrada y salida durante el servicio a vehículos
Fuente: Elaboración propia

El insumo contabilizado para el servicio a vehículos se consideraron en la Ecuación 565 y su respectivo transporte con la Ecuación 566.

$$\frac{\text{aceites (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de arandelas (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 565

$$\frac{\text{aceites transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{aceites totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 566

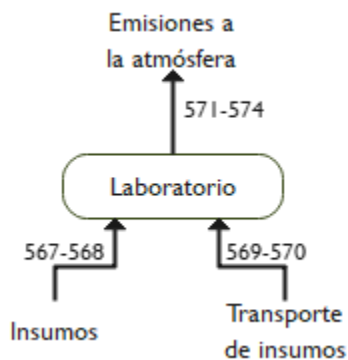


Figura 85. Flujos de entrada y salida en el laboratorio

Fuente: Elaboración propia

Los insumos consumidos en laboratorio fueron:

$$\frac{\text{electrodos (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de arandelas (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 567

$$\frac{\text{oxígeno (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de arandelas (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 568

Y su respectivo transporte de insumos

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{aceites totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 569

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno total adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 570

Emisiones generadas por el uso de electrodos

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 571 -Ecuación 574. En ella se relaciona la cantidad de insumo consumido y un factor de emisión vinculado a los gases generados.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 571

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 572

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 573

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 574

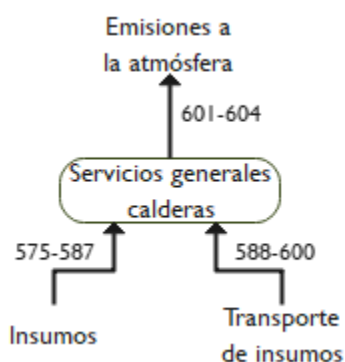


Figura 86. Flujos de entrada y salida de los servicios generales en calderas
Fuente: Elaboración propia

El resto de los insumos que no se contabilizaron para los equipos en específicos se muestran a continuación.

$$\frac{\text{placa de acero (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de placa de acero (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 575

$$\frac{\text{arandela (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de arandelas(ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 576

$$\frac{\text{tornillos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de tornillos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 577

$$\frac{\text{ladrillo (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de ladrillo (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 578

$$\frac{\text{solera (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de solera (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 579

$$\frac{\text{concreto (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de concreto (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 580

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 581

$$\frac{\text{aceites (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de aceites (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 582

$$\frac{\text{grasas (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de grasas (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 583

$$\frac{\text{gas LP (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de gas LP (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 584

$$\frac{\text{oxígeno (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de oxígeno (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 585

$$\frac{\text{óxido de calcio (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{óxido de calcio (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 586

$$\frac{\text{cemento (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cemento(ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 587

A su vez, por el respectivo transporte:

$$\frac{\text{placas de acero transportadas (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{placas de acero adquiridas (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 588

$$\frac{\text{arandelas transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{arandelas adquiridas (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 589

$$\frac{\text{tornillos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 590

$$\frac{\text{ladrillos (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{ladrillos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 591

$$\frac{\text{solera transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{solera adquirida (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 592

$$\frac{\text{concreto transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{concreto adquirid (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 593

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 594

$$\frac{\text{aceites transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{aceites adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 595

$$\frac{\text{grasa transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{grasa adquiridas (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 596

$$\frac{\text{gas LP transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{gas LP adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 597

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno transportado (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 598

$$\frac{\text{óxido de calcio transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{óxido de calcio adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 599

$$\frac{\text{cemento (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cemento adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 600

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 601 - Ecuación 604.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 601

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 602

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 603

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 604

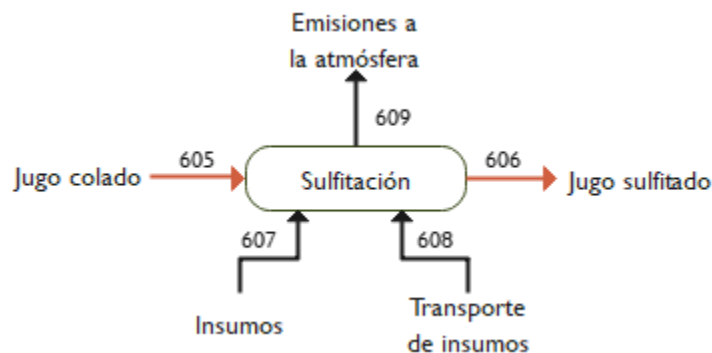


Figura 87. Flujos de entrada y salida de la sulfitación

Fuente: Elaboración propia

Entrada de jugo

$$\frac{\text{jugo colado de salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo colado de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 605

Salida de jugo sulfitado

$$\frac{\text{jugo sulfitado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo colado de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{azufre (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 606

Insumo

$$\frac{\text{azufre (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{azufre total consumido (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 607

Transporte

$$\frac{\text{azufre (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cemento adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 608

SO₂ emitido

$$\frac{\text{Dióxido de azufre (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{kg SO}_2}{\text{ton}} \right) + \frac{\text{azufre (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 609



Figura 88. Flujos de entrada y salida del tanque colchón
Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{jugo de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo filtrado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 610

$$\frac{\text{jugo de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo filtrado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 611

Salida

$$\frac{\text{jugo de salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 612

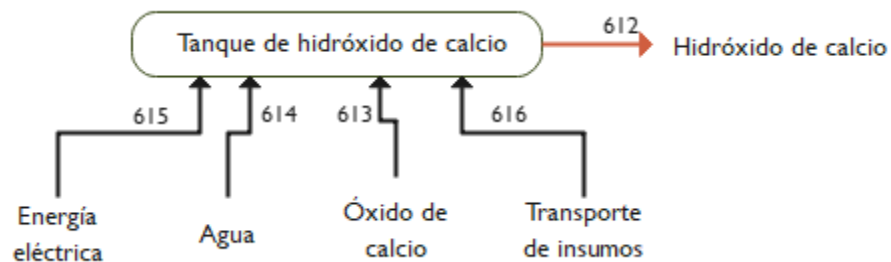


Figura 89. Flujos de entrada y salida del tanque de hidróxido de calcio
Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{óxido de calcio (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{óxido total consumido (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 613

$$\frac{\text{agua (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua total consumida (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 614

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del tanque de hidróxido de calcio se calculó con la Ecuación 615

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión } \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}}\right) * \text{horas de funcionamiento } \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}}\right)}{\frac{\text{producción total de azúcar } \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}}\right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 615

Transporte

$$\frac{\text{óxido de calcio transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{óxido de calcio adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total viajes}$$

Ecuación 616

Salida

$$\frac{\text{hidróxido de calcio (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{óxido de calcio (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Agua (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 617

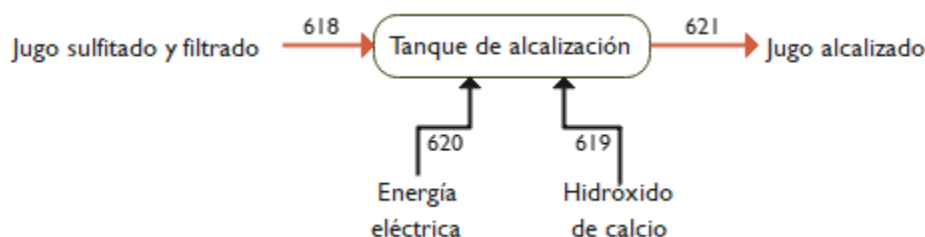


Figura 90. Flujos de entrada y salida del tanque de alcalización

Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{Jugo sulfitado y filtrado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{jugo de salida de tanque colchón (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 618

$$\frac{\text{hidróxido de calcio de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{hidróxido de calcio de salida de tanque (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 619

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del tanque de alcalización se contabilizó mediante la Ecuación 620.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 620

Salida

$$\frac{\text{Jugo alcalizado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo sulfitado y filtrado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{hidróxido de calcio (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 621

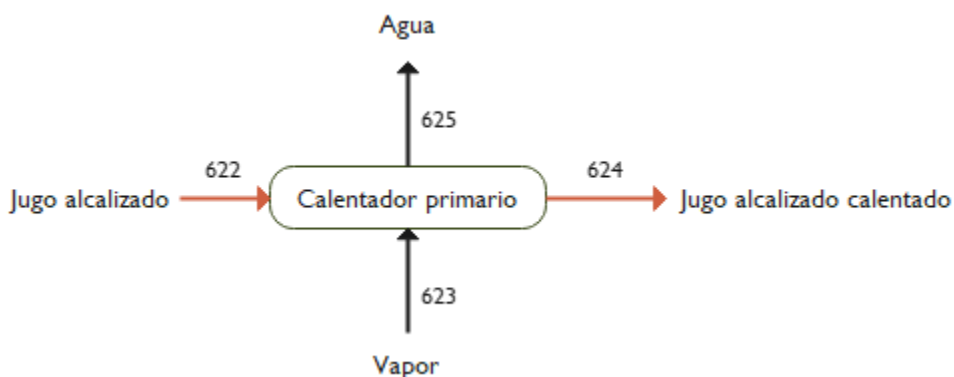


Figura 91. Flujos de entrada y salida del calentador primario

Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{Jugo alcalizado de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo alcalizado de salida de alcalización (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 622

Vapor

$$\frac{\text{Vapor 1 para calentador primario (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de jugo} * C_{p_{\text{jugo}}} * (T_2 - T_1) \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 623

Salida

$$\frac{\text{Jugo alcalizado calentado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo alcalizado de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 624

$$\frac{\text{Agua condensada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor 1 para calentador primario (MJ)} * \frac{1}{\text{calor latente } \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}}\right)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 625

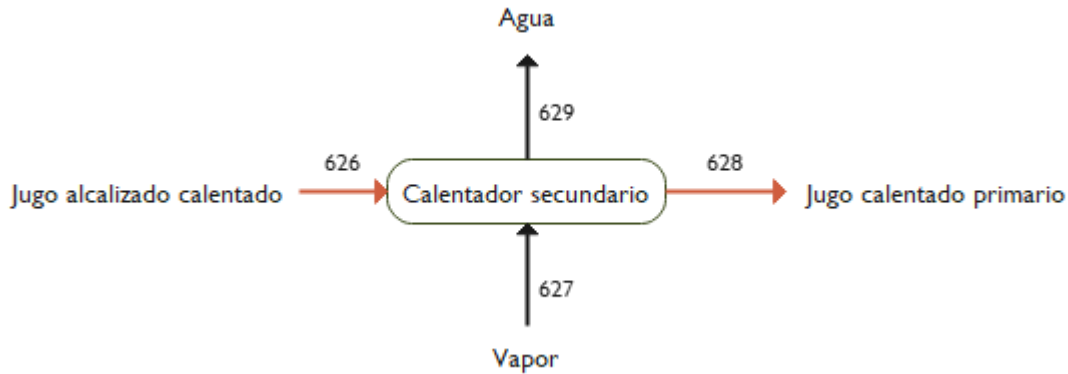


Figura 92. Flujos de entrada y salida del calentador secundario

Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{Jugo alcalizado calentado 2 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo alcalizado calentado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 626

Vapor

$$\frac{\text{Vapor 2 para calentador primario (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de jugo} * C_{p_{\text{jugo}}} * (T_2 - T_1) \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 627

Salida

$$\frac{\text{Jugo alcalizado calentado 2 salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo alcalizado calentado 2 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 628

$$\frac{\text{Agua condensada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor 2 para calentador primario (MJ)} * \frac{1}{\text{calor latente } \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}}\right)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 629

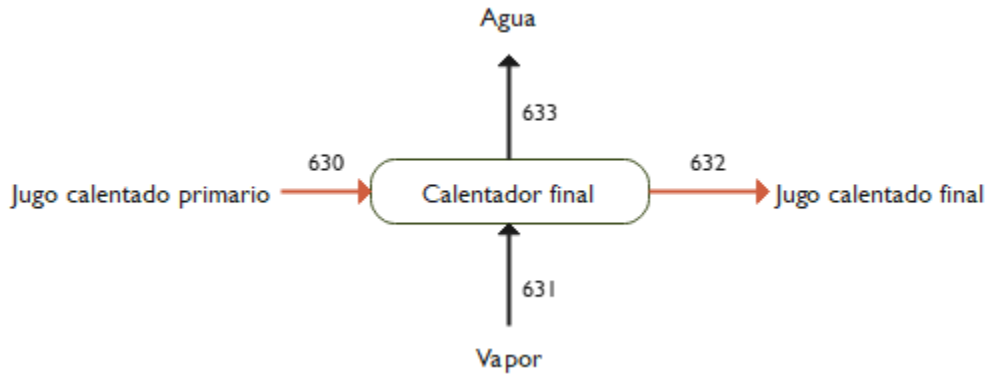


Figura 93. Flujos de entrada y salida del calentador final
Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{Jugo alcalizado calentado 3 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo alcalizado calentado 2 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 630

Vapor

$$\frac{\text{Vapor 3 para calentador primario (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de jugo} * Cp_{\text{jugo}} * (T_2 - T_1) \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 631

Salida

$$\frac{\text{Jugo alcalizado calentado 3 salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo alcalizado calentado 3 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 632

$$\frac{\text{Agua condensada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor 3 para calentador primario (MJ)} * \frac{1}{\text{calor latente} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 633

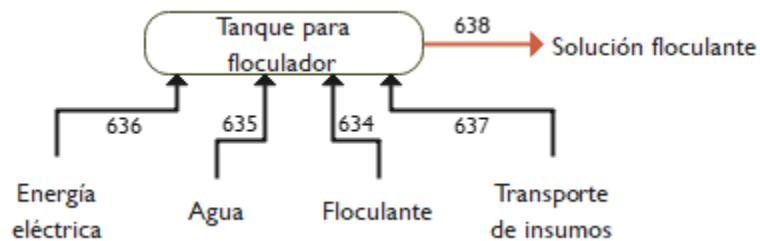


Figura 94. Flujos de entrada y salida del tanque para floculador
Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{floculante (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{floculante total consumido (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 634

$$\frac{\text{agua (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua total consumida (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 635

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del tanque de floculación se contabilizó mediante la Ecuación 636.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 636

Transporte

$$\frac{\text{floculante transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{óxido de calcio adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 637

$$\frac{\text{solución floculante (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{floculante (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Agua (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 638

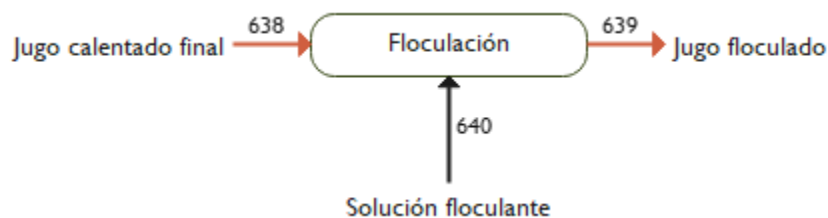


Figura 95. Flujos de entrada y salida de la floculación
Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{Jugo alcalizado calentado 3 entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo alcalizado calentado 3 salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 639

$$\frac{\text{solución floculante de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{solución floculante (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 640

Salida

$$\frac{\text{Jugo alcalizado calentado floculado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo alcalizado calentado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{solución floculante (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 641

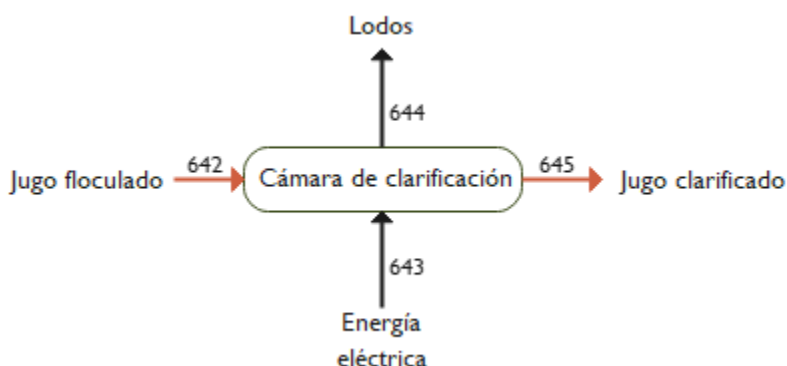


Figura 96. Flujos de entrada y salida de la cámara de clarificación
Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{Jugo alcalizado calentado floculado entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo alcalizado calentado floculado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 642

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de la cámara de clarificación se contabilizó mediante la Ecuación 643.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 643

Salida

$$\frac{\text{lodos (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{generación lodos} * \frac{\text{Jugo mezclado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 644

$$\frac{\text{Jugo clarificado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo alcalizado calentado floculado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Lodos (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 645

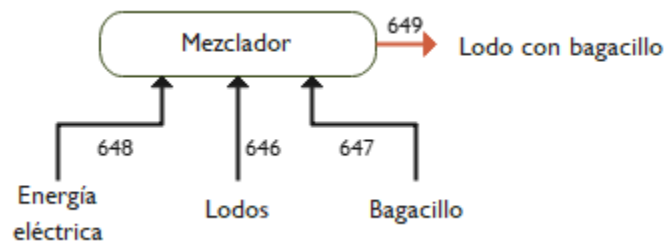


Figura 97. Flujos de entrada y salida del mezclador

Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{Lodos de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Lodos (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 646

$$\frac{\text{Bagacillo (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{bagacillo} * \frac{\text{Lodos (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 647

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del mezclador se contabilizó mediante la Ecuación 648.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 648

Salida

$$\frac{\text{lodo con bagacillo (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Lodos de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Bagacillo (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 649

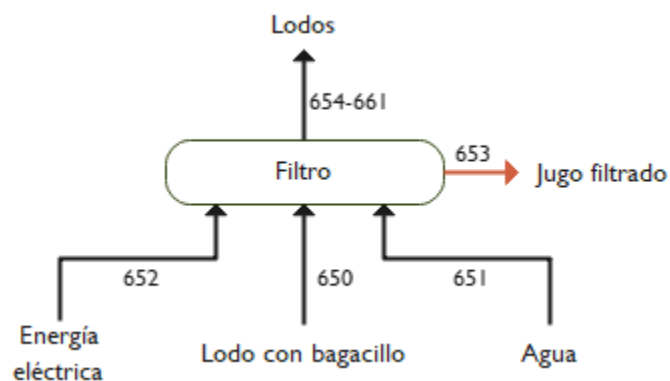


Figura 98. Flujos de entrada y salida del filtro
Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{lodo con bagacillo de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Lodo con bagacillo (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 650

$$\frac{\text{agua (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Cantidad de agua consumida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 651

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del filtro se contabilizó mediante la ecuación 652.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

ecuación 652

Salida

$$\frac{\text{Jugo filtrado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{jugo filtrado} * \frac{\text{Jugo mezclado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 653

$$\frac{\text{lodos residuales (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo filtrado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Lodo con bagacillo de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 654

$$\frac{\text{materia orgánica (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{materia orgánica} * \frac{\text{Lodos residuales (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 655

$$\frac{\text{nitrógeno (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{nitrógeno} * \frac{\text{Lodos residuales (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 656

$$\frac{\text{fósforo (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{fósforo} * \frac{\text{Lodos residuales (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 657

$$\frac{\text{potasio (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{potasio} * \frac{\text{Lodos residuales (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 658

$$\frac{\text{calcio (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{calcio} * \frac{\text{Lodos residuales (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 659

$$\frac{\text{magnesio (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{magnesio} * \frac{\text{Lodos residuales (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 660

$$\frac{\text{azufre (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{azufre} * \frac{\text{Lodos residuales (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 661

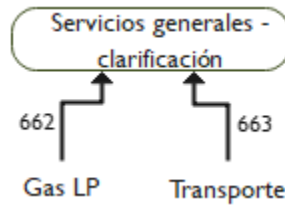


Figura 99. Flujos de entrada de los servicios generales en clarificación
Fuente: Elaboración propia

Insumo

$$\frac{\text{gas LP (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de oxígeno (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 662

Transporte de insumos

$$\frac{\text{gas LP transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{arandela total adquirida (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 663

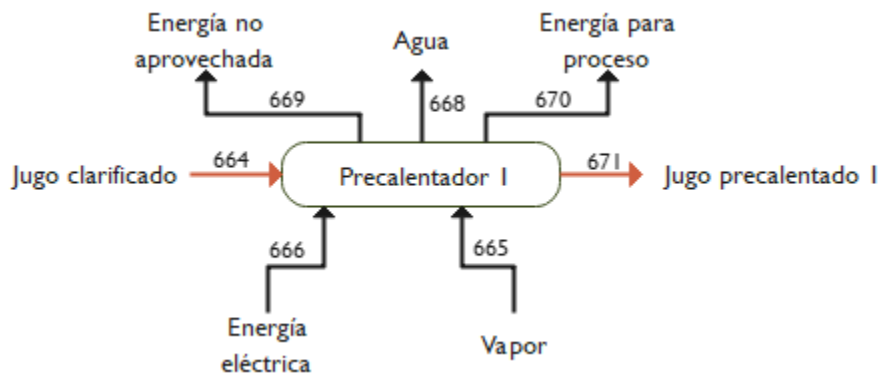


Figura 100. Flujos de entrada y salida del precalentador I
Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{Jugo clarificado de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo clarificado de salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 664

$$\frac{\text{Vapor de precalentador 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor total generado (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Vapor planta de fuerza(MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Vapor para molienda(MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Vapor para secado (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 665

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del precalentador 1 se contabilizó mediante la Ecuación 666.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 666

Energía requerida

$$\frac{\text{Vapor para precalentador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de jugo claro} * \text{Cp}_{\text{jugoclaro}} * (T_2 - T_1) \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 667

Agua condensada

$$\frac{\text{Agua condensada precalentador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor para precalentador (MJ)} * \frac{1}{\text{calor latente} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 668

Energía perdida

$$\frac{\text{Energía perdida precalentador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{pérdida} * \frac{\text{Vapor para precalentador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 669

Energía para siguiente calentador

$$\frac{\text{Energía disponible para precalentador 2 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor de precalentador 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Vapor para precalentador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Energía perdida precalentador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 670

Salida

$$\frac{\text{Jugo precalentado 1 entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo precalentado 1 salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 671

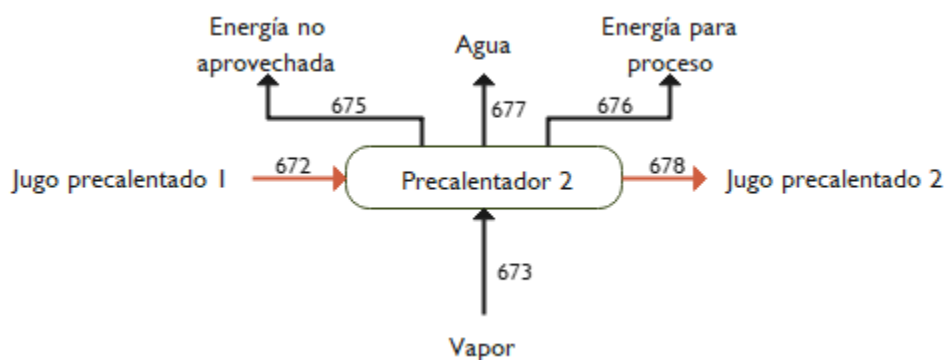


Figura 101. Flujos de entrada y salida del precalentador 2

Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{Jugo precalentado 2 entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo precalentado 1 salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 672

Energía

$$\begin{aligned} & \frac{\text{Energía disponible para precalentador 2 entrada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} \\ &= \frac{\text{Energía disponible para precalentador 2 salida (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} \end{aligned}$$

Ecuación 673

Energía requerida

$$\frac{\text{Vapor para precalentador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de jugo precalentado 1} * C_{p_{\text{jugoclara}}} * (T_2 - T_1) \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 674

Energía perdida

$$\frac{\text{Energía perdida precalentador 2 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \%p\acute{e}rdida * \frac{\text{Vapor para precalentador 2 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 675

Energía para siguiente calentador

$$\begin{aligned} & \frac{\text{Energía disponible para evaporador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} \\ &= \frac{\text{Energía disponible para precalentador 2 entrada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} \\ &- \frac{\text{Vapor para precalentador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Energía perdida precalentador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} \end{aligned}$$

Ecuación 676

Salida

$$\frac{\text{Agua condensada precalentador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor para precalentador (MJ)} * \frac{1}{\text{calor latente } \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}}\right)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 677

Jugo precalentado 2

$$\frac{\text{Jugo precalentado 2 salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo precalentado 1 entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 678

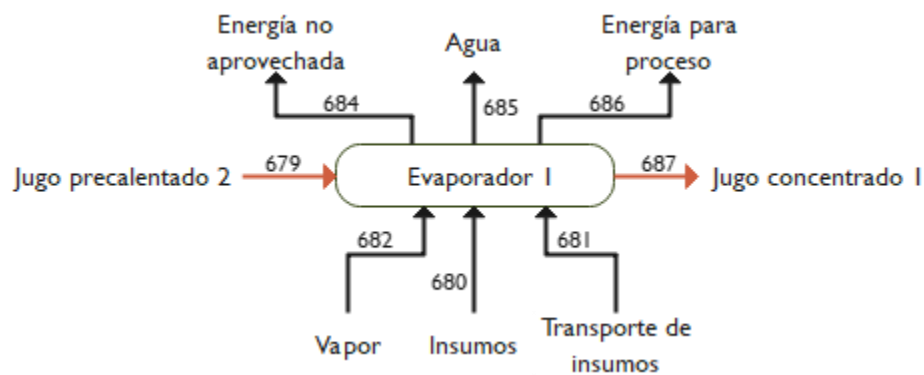


Figura 102. Flujos de entrada y salida del evaporador I

Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{Jugo precalentado 2 entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo precalentado 2 salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 679

$$\frac{\text{sosa cáustica (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de sosa cáustica (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 680

A su vez, por el respectivo transporte:

$$\frac{\text{sosa cáustica transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 681

Vapor de entrada

Energía para siguiente calentador

$$\frac{\text{Energía para evaporador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Energía disponible para evaporador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 682

Energía requerida

$$\frac{\text{Vapor para evaporador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de jugo precalentado 1} * C_{p_{\text{jugoclara}}} * (T_2 - T_1) \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 683

Energía perdida

$$\frac{\text{Energía perdida evaporador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{pérdida} * \frac{\text{Vapor para evaporador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 684

Agua condensada

$$\frac{\text{Agua condensada evaporador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor para evaporador 1 (MJ)} * \frac{1}{\text{calor latente} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 685

Salida

Vapor eliminado de jugo y disponible para calentadores

$$\frac{\text{Vapor de jugo 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de agua evaporada} * C_{p_{\text{agua}}} * (T_2 - T_1) \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 686

Jugo concentrado 1

$$\frac{\text{Jugo concentrado 1 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo claro calentado 2 (ton)} * \text{° brix entrada} * \frac{1}{\text{° brix salida}}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 687

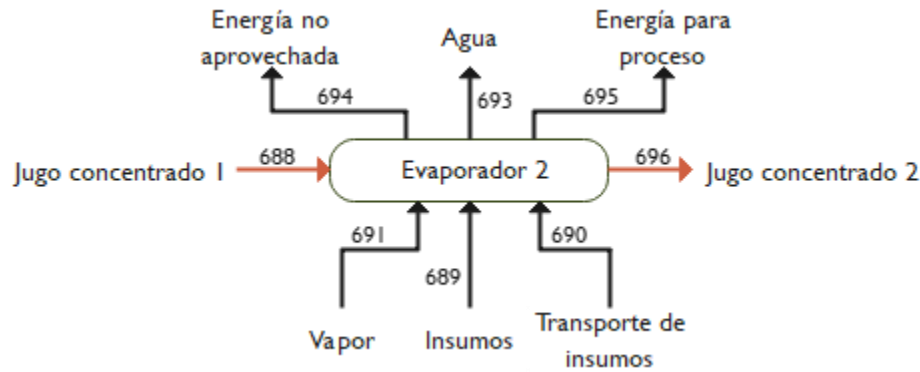


Figura 103. Flujos de entrada y salida del evaporador 2

Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{Jugo concentrado 1 entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo concentrado 1 salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 688

$$\frac{\text{sosa cáustica (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de sosa cáustica (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 689

A su vez, por el respectivo transporte:

$$\frac{\text{sosa cáustica transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 690

Vapor de entrada

$$\frac{\text{Vapor de jugo 1 entrada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor de jugo 1 salida (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 691

Energía requerida

$$\frac{\text{Vapor para evaporador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de jugo precalentado 1} * \text{Cp}_{\text{jugoclaro}} * (T_2 - T_1) \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 692

Agua condensada de vapor de entrada

$$\frac{\text{Agua condensada vapor de jugo 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor de jugo 1 entrada (MJ)} * \frac{1}{\text{calor latente } \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}}\right)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 693

Energía perdida

$$\frac{\text{Energía perdida precalentador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{pérdida} * \frac{\text{Vapor para precalentador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 694

Vapor generado por calentamiento de agua en jugo evaporado 3

$$\frac{\text{Vapor de jugo 2 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de agua evaporada} * C_{p_{\text{agua}}} * (T_2 - T_1) \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Energía perdida precalentador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 695

Jugo concentrado 2 de salida

$$\frac{\text{Jugo concentrado 2 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo evaporado 1 (ton)} * \text{° brix entrada} * \frac{1}{\text{° brix salida}}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 696

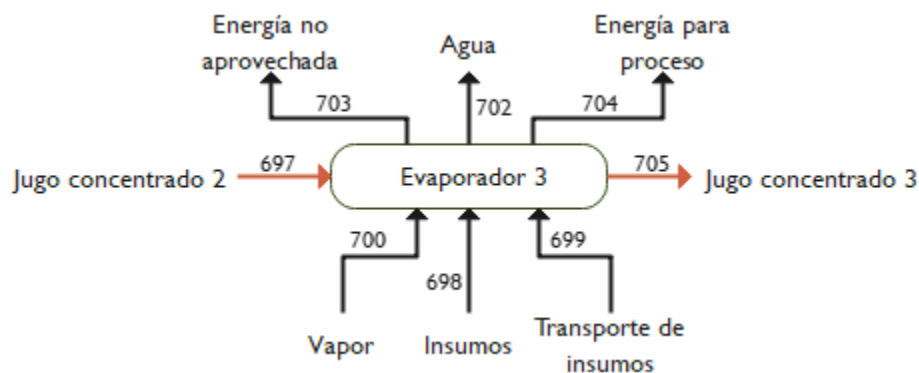


Figura 104. Flujos de entrada y salida del evaporador 3
Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{Jugo concentrado 2 entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo concentrado 2 salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 697

$$\frac{\text{sosa cáustica (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de sosa cáustica (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 698

A su vez, por el respectivo transporte:

$$\frac{\text{sosa cáustica transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 699

Vapor de entrada

$$\frac{\text{Vapor de jugo 2 entrada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor de jugo 2 salida (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 700

Energía requerida

$$\frac{\text{Vapor para evaporador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de jugo precalentado 1} * C_{p_{\text{jugoclara}}} * (T_2 - T_1) \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 701

Agua condensada de vapor de entrada

$$\frac{\text{Agua condensada vapor de jugo 2 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor de jugo 1 entrada (MJ)} * \frac{1}{\text{calor latente} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 702

Energía perdida

$$\frac{\text{Energía perdida precalentador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{pérdida} * \frac{\text{Vapor para precalentador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 703

Vapor generado por calentamiento de agua en jugo evaporado 4

$$\frac{\text{Vapor de jugo 2 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de agua evaporada} * C_{p_{\text{agua}}} * (T_2 - T_1) \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Energía perdida precalentador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 704

Jugo concentrado 3 de salida

$$\frac{\text{Jugo concentrado 3 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo evaporado 1 (ton)} * \text{° brix entrada} * \frac{1}{\text{° brix salida}}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 705

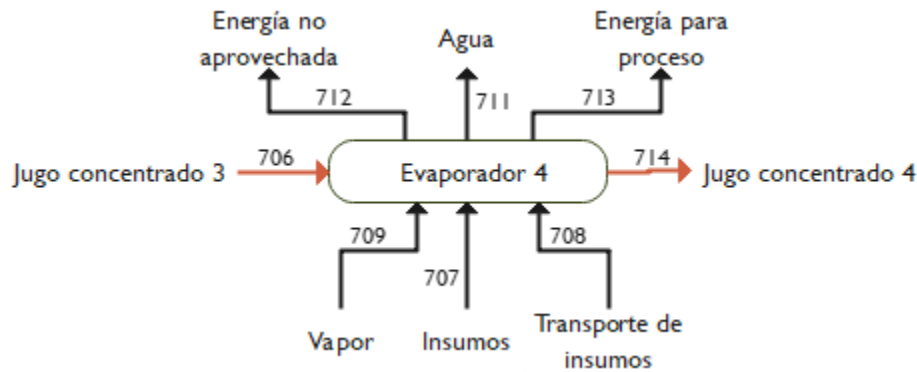


Figura 105. Flujos de entrada y salida del evaporador 4

Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{Jugo concentrado 3 entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo concentrado 3 salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 706

$$\frac{\text{sosa cáustica (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de sosa cáustica (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 707

A su vez, por el respectivo transporte:

$$\frac{\text{sosa cáustica transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 708

Vapor de entrada

$$\frac{\text{Vapor de jugo 3 entrada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor de jugo 3 salida (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 709

Energía requerida

$$\frac{\text{Vapor para evaporador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de jugo precalentado 1} * C_{p_{\text{jugoclara}}} * (T_2 - T_1) \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 710

Agua condensada de vapor de entrada

$$\frac{\text{Agua condensada vapor de jugo 3 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor de jugo 3 entrada (MJ)} * \frac{1}{\text{calor latente} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 711

Energía perdida

$$\frac{\text{Energía perdida evaporador 3 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{pérdida} * \frac{\text{Vapor para evaporador 3 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 712

Vapor generado por calentamiento de agua en jugo evaporado 5

$$\frac{\text{Vapor de jugo 4 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de agua evaporada} * C_{p_{\text{agua}}} * (T_2 - T_1) \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Energía perdida evaporador 4 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 713

Jugo concentrado 3 de salida

$$\frac{\text{Jugo concentrado 4 (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo evaporado 1 (ton)} * \text{° brix entrada} * \frac{1}{\text{° brix salida}}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 714

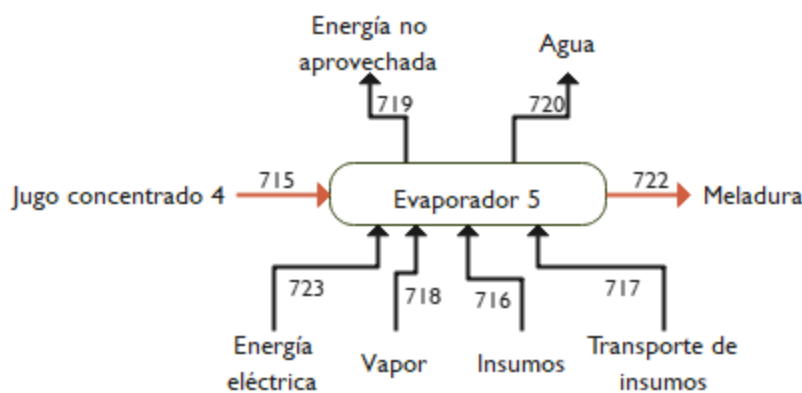


Figura 106. Flujos de entrada y salida del evaporador 5
Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{Jugo concentrado 4 entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo concentrado 4 salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 715

$$\frac{\text{sosa cáustica (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de sosa cáustica (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 716

A su vez, por el respectivo transporte:

$$\frac{\text{sosa cáustica transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 717

Vapor de entrada

$$\frac{\text{Vapor de jugo 4 entrada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor de jugo 4 salida (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 718

Energía requerida

$$\frac{\text{Vapor para evaporador 1 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de jugo precalentado 1} * \text{Cp}_{\text{jugoclara}} * (T_2 - T_1) \text{ (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 719

Agua condensada de vapor de entrada

$$\frac{\text{Agua condensada vapor de jugo 4 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor de jugo 4 entrada (MJ)} * \frac{1}{\text{calor latente} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 720

Energía perdida

$$\frac{\text{Energía perdida evaporador 5 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{pérdida} * \frac{\text{Vapor para evaporador 5 (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 721

Meladura

$$\frac{\text{Meladura (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Jugo evaporado 4 (ton)} * \text{° brix entrada} * \frac{1}{\text{° brix salida}}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 722

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del evaporador 5 se contabilizó mediante la Ecuación 723.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}$$

= $\frac{\text{Eficiencia del motor}}{\text{Eficiencia del motor}}$

Ecuación 723

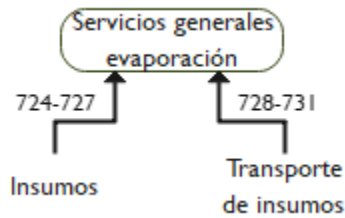


Figura 107. Flujos de entrada de los servicios generales en evaporación
Fuente: Elaboración propia

Los insumos utilizados durante el mantenimiento del tanque de jugo mezclado se representan en las ecuaciones Ecuación 724 a Ecuación 727.

$$\frac{\text{gas LP}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de gas LP (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 724}$$

$$\frac{\text{placa de acero}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de placa de acero(kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 725}$$

$$\frac{\text{oxígeno}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de oxígeno (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 726}$$

$$\frac{\text{materiales de acero}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad total de materiales de acero(kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}} \quad \text{Ecuación 727}$$

El transporte que representó cada insumo se observa en las ecuaciones Ecuación 728 a Ecuación 731.

$$\frac{\text{gas LP transportado (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{gas LP totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes} \quad \text{Ecuación 728}$$

$$\frac{\text{placa de acero transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{placas totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes} \quad \text{Ecuación 729}$$

$$\frac{\text{oxígeno transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes} \quad \text{Ecuación 730}$$

$$\frac{\text{materiales de acero transportados (kgkm)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{materiales totales adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 731

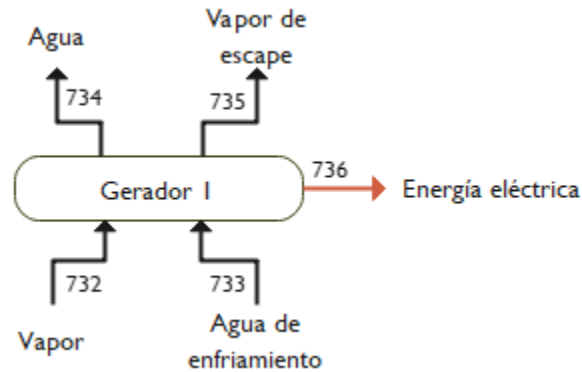


Figura 108. Flujos de entrada y salida del generador I
Fuente: Elaboración propia

Vapor requerido

$$\frac{\text{energía (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{vapor consumido (ton)}}{\text{hora}} * \text{horas total (hora)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{entalpía calculada} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 732

Agua de enfriamiento

$$\frac{\text{agua de enfriamiento (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua consumida} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \right) * \text{horas de consumo total (horas)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 733

Agua de enfriamiento de salida

$$\frac{\text{agua de enfriamiento de salida (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua de enfriamiento de entrada (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 734

Vapor de escape

$$\frac{\text{vapor de escape (MJ)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{ton de vapor (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \text{entalpía de vapor escape} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 735

Energía eléctrica generada

$$\frac{\text{energía eléctrica (kWh)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \% \text{ de producción} * \frac{\text{energía eléctrica total producida (kWh)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 736

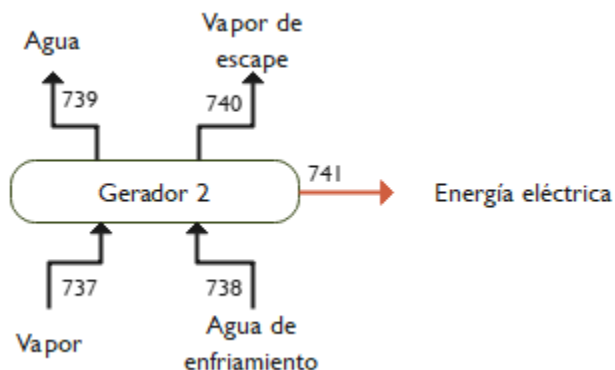


Figura 109. Flujos de entrada y salida del generador 2
Fuente: Elaboración propia

Entrada

Vapor requerido

$$\frac{\text{energía (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{vapor consumido (ton)}}{\text{hora}} * \text{horas total (hora)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{entalpía calculada} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 737

Agua de enfriamiento

$$\frac{\text{agua de enfriamiento (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua consumida} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \right) * \text{horas de consumo total (horas)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 738

Salida

Agua de enfriamiento de salida

$$\frac{\text{agua de enfriamiento de salida (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{agua de enfriamiento de entrada (m}^3\text{)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 739

Vapor de escape

$$\frac{\text{vapor de escape (MJ)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \frac{\text{ton de vapor (ton)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \text{entalpía de vapor escape} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)$$

Ecuación 740

Energía eléctrica generada

$$\frac{\text{energía eléctrica (kWh)}}{\text{producción de azúcar (g)}} = \% \text{ de producción} * \frac{\text{energía eléctrica total producida (kWh)}}{\text{producción de azúcar (g)}}$$

Ecuación 741

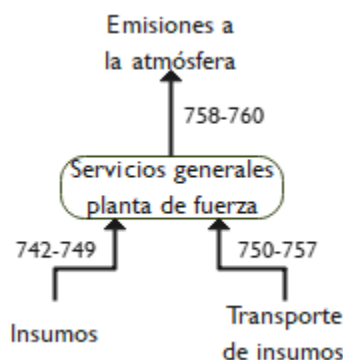


Figura 110. Flujos de entrada y salida de la planta de fuerza

Fuente: Elaboración propia

Los insumos que no se detectaron de manera específica para los equipos individuales se colocaron en el apartado de servicios generales para la recepción de materia prima. A continuación, se especifican las ecuaciones utilizadas.

$$\frac{\text{placa de acero (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de placa de acero (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 742

$$\frac{\text{aceites (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de aceites (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 743

$$\frac{\text{cemento (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de cemento (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 744

$$\frac{\text{cable (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cable (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 745

$$\frac{\text{solvente (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de solvente (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 746

$$\frac{\text{oxígeno (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de oxígeno (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 747

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 748

$$\frac{\text{insumos de acero (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de insumos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 749

La cantidades de insumos transportados se calcularon con la ecuaciones Ecuación 750 Ecuación 84- Ecuación 757, las cuales relacionan la cantidad de insumo transportado y la cantidad de viajes realizados.

$$\frac{\text{placa de acero transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{placas adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 750

$$\frac{\text{aceites transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{aceites adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 751

$$\frac{\text{cemento transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cemento adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 752

$$\frac{\text{cable transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cables adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 753

$$\frac{\text{solvente transportadas (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{solvente adquiridas (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 754

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 755

$$\frac{\text{electrodos transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquirida (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 756

$$\frac{\text{insumos de acero transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{insumos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 757

Emisiones por electrodos

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 758

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 759

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 760

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 761

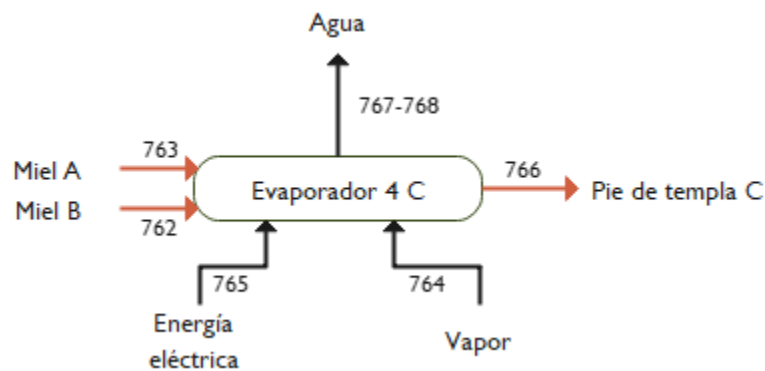


Figura III. Flujos de entrada y salida del evaporador 4C
Fuente: Elaboración propia

Entrada

Miel B

$$\frac{\text{Miel B (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\% \text{ sólidos en miel B} * \frac{\text{sólidos en templa de B (ton)}}{\text{° brix entrada}}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 762

Miel A

$$\frac{\text{Miel A (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\% \text{ de ensemillamiento con miel B} * \frac{\text{Miel B (ton)}}{\text{° brix entrada}}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 763

Vapor de evaporación

$$\frac{\text{Energía de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{Vapor de entrada (MJ)}}{\text{Vapor total consumido (MJ)}} * \text{Vapor consumido (ton)} * \text{entalpía de vapor} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 764

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del evaporador 4C se contabilizó mediante la Ecuación 765.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 765

Salida

Pie de templa

$$\frac{\text{Pie de templa C (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{ de sembramiento con miel A} * \frac{\text{Miel A (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \% \text{ de sembramiento con miel B} * \frac{\text{Miel B (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 766

Agua evaporada

$$\frac{\text{Agua evaporada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Miel B (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Miel A (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Pie de templa C (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 767

Agua condensada

$$\frac{\text{Agua condensada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor de entrada (MJ)} * \frac{1}{\text{calor latente} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 768

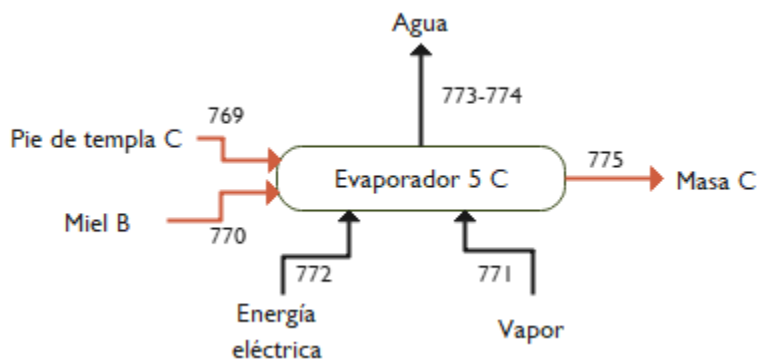


Figura I 12. Flujos de entrada y salida del evaporador 5C
Fuente: Elaboración propia

Entrada

Pie de templa C

$$\frac{\text{Pie de templa C de entrada(ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{ de consumo} * \frac{\text{Pie de templa C de entrada(ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 769

Miel B

$$\frac{\text{Miel B entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{ de consumo} * \frac{\text{Miel B (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 770

Vapor de evaporación

$$\frac{\text{Energía de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{Vapor de entrada (MJ)}}{\text{Vapor total consumido (MJ)}} * \text{Vapor consumido (ton)} * \text{entalpía de vapor} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 771

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del evaporador 5C contabilizó mediante la Ecuación 772.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 772

Agua evaporada

$$\frac{\text{Agua evaporada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Pie de templa C de entrada(ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Miel B entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Pie de templa C de entrada(ton)} * \frac{1}{\text{° brix}}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Miel B entrada (ton)} * \frac{1}{\text{° brix}}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 773

Agua condensada

$$\frac{\text{Agua condensada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor de entrada (MJ)} * \frac{1}{\text{calor latente } \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}}\right)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 774

Masa C

$$\frac{\text{Masa de C salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{ de rendimiento templa de C} * \left(\frac{\text{Pie de templa C de entrada(ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Miel B entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Agua evaporada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} \right)$$

Ecuación 775

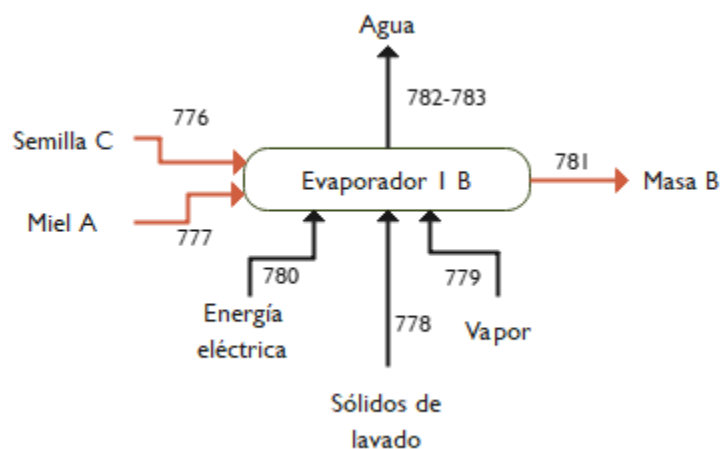


Figura I 13. Flujos de entrada y salida del evaporador IB
Fuente: Elaboración propia

Entrada

Semilla C

$$\frac{\text{semilla de C entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Masa de C salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 776

Miel A

$$\frac{\text{Miel A de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{ sólidos en miel A} * \frac{\text{Miel A (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 777

Lavado

$$\frac{\text{Sólidos en lavado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{ sólidos en azúcar A} * \frac{\text{Sólidos en azúcar sin lavar (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 778

Vapor de evaporación

$$\frac{\text{Energía de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{Vapor de entrada (MJ)}}{\text{Vapor total consumido (MJ)}} * \text{Vapor consumido (ton)} * \text{entalpía de vapor} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 779

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del evaporador 1B se contabilizó mediante la Ecuación 780.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}}{\text{Eficiencia del motor}}$$

Ecuación 780

Salida

Semilla B

$$\frac{\text{semilla de B (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{semilla de C (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{miel de A (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Sólidos en lavado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 781

Agua evaporada

$$\frac{\text{Agua evaporada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{semilla de C entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Miel A de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Sólidos en lavado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{semilla de C entrada (ton)} * \frac{1}{\text{° brix}}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Miel A de entrada (ton)} * \frac{1}{\text{° brix}}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Sólidos en lavado (ton)} * \frac{1}{\text{° brix}}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 782

Agua condensada

$$\frac{\text{Agua condensada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor de entrada (MJ)} * \frac{1}{\text{calor latente } \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}}\right)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 783

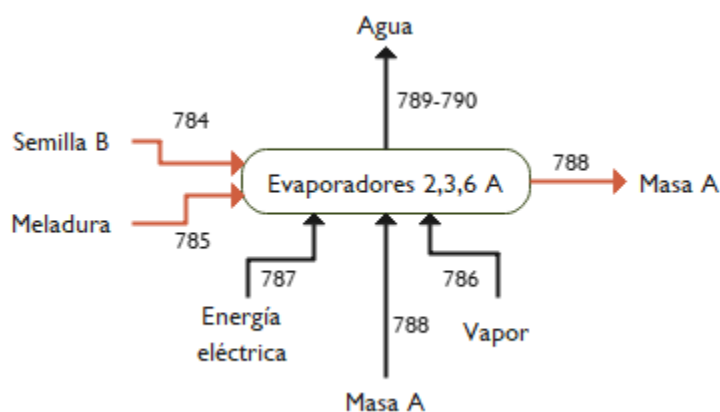


Figura I 14. Flujos de entrada y salida de los evaporadores 2,3,6 A

Fuente: Elaboración propia

Entrada

Semilla B

$$\frac{\text{semilla de B de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{semilla de B de salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 784

Meladura

$$\frac{\text{Meladura de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Meladura de salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 785

Vapor de evaporación

$$\frac{\text{Energía de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\frac{\text{Vapor de entrada (MJ)}}{\text{Vapor total consumido (MJ)}} * \text{Vapor consumido (ton)} * \text{entalpía de vapor } \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}}\right)}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 786

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de los evaporadores 2,3,6 A se contabilizó mediante la Ecuación 787.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}$$

$$= \frac{\text{Eficiencia del motor}}{\text{Eficiencia del motor}}$$

Ecuación 787

Masa de A

$$\frac{\text{Masa de A (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Semilla de B (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Miel de B (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 788

Salida

Agua evaporada

$$\frac{\text{Agua evaporada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{semilla de B de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Meladura de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{semilla de B de entrada (ton)} * \frac{1}{\text{° brix}}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Meladura de entrada (ton)} * \frac{1}{\text{° brix}}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 789

Agua condensada

$$\frac{\text{Agua condensada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Vapor de entrada (MJ)} * \frac{1}{\text{calor latente} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 790

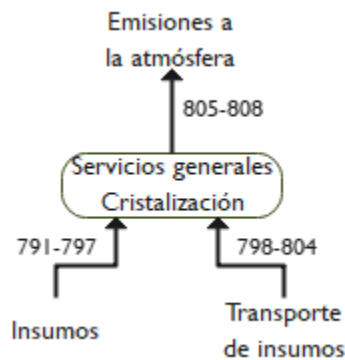


Figura I I 5. Flujos de entrada y salida de los servicios generales durante la cristalización

Fuente: Elaboración propia

El resto de los insumos que no se contabilizaron para los equipos en específicos se muestran a continuación.

$$\frac{\text{cincho (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de cincho (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 791

$$\frac{\text{placa de acero (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de placa de acero (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 792

$$\frac{\text{arandela (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de arandelas(ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 793

$$\frac{\text{tornillos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de tornillos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 794

$$\frac{\text{gas LP (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de gas LP (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 795

$$\frac{\text{oxígeno (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de oxígeno (ton)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 796

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 797

A su vez, por el respectivo transporte:

$$\frac{\text{cinchos transportadas (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cinchos adquiridas (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 798

$$\frac{\text{placas de acero transportadas (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{placas de acero adquiridas (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 799

$$\frac{\text{arandelas transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{arandelas adquiridas (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 800

$$\frac{\text{tornillos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 801

$$\frac{\text{gas LP transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{gas LP adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 802

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno transportado (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 803

$$\frac{\text{electrodos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 804

Para las emisiones generadas por el uso de electrodos, se contabilizaron las emisiones con las ecuaciones Ecuación 805 - Ecuación 808.

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 805

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 806

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 807

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 808

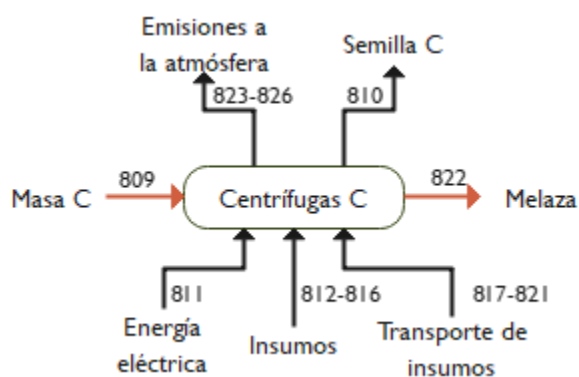


Figura 116. Flujos de entrada y salida de centrifugas C
Fuente: Elaboración propia

Masa C

$$\frac{\text{Masa de C entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Masa de C salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 809

Semilla de C

$$\frac{\text{Semilla de C entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Semilla de C salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 810

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de la centrífuga C se contabilizó mediante la Ecuación 811.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 811

Insumos

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 812

$$\frac{\text{aceites (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de aceites (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 813

$$\frac{\text{arandelas (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de arandelas (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 814

$$\frac{\text{tornillos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de tornillos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 815

$$\frac{\text{insumos de acero (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de insumos de acero (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 816

Transporte de insumos

$$\frac{\text{electrodos transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquirida (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 817

$$\frac{\text{aceites transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{aceites adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 818

$$\frac{\text{arandelas transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{arandelas adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 819

$$\frac{\text{tornillos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 820

$$\frac{\text{insumos de acero transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{insumos de acero adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 821

Salida

Melaza

$$\frac{\text{Melaza (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Pie de temple C (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Miel B (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Semilla C (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 822

Emisiones por electrodos

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 823

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 824

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 825

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 826

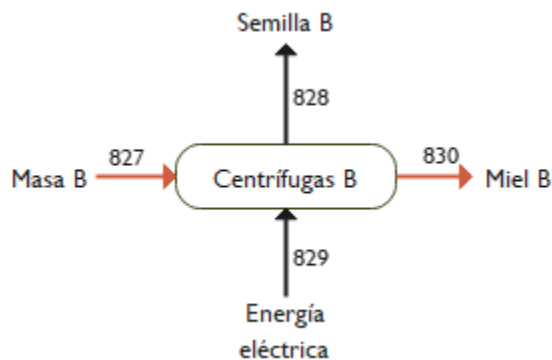


Figura I 17. Flujos de entrada y salida de centrífugas B

Fuente: Elaboración propia

Entrada

Masa de B

$$\frac{\text{Masa de B entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Masa de B salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 827

Salida

Semilla de B

$$\frac{\text{Semilla de B (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Semilla de C (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Miel de A (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Sólidos en lavado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 828

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de la centrífuga B se contabilizó mediante la Ecuación 829.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 829

Miel de B

$$\frac{\text{Miel de B entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{ rendimiento de templa de B} * \left(\frac{\text{Semilla de C (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} \right) + \frac{\text{Miel de A (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Sólidos de lavado (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 830

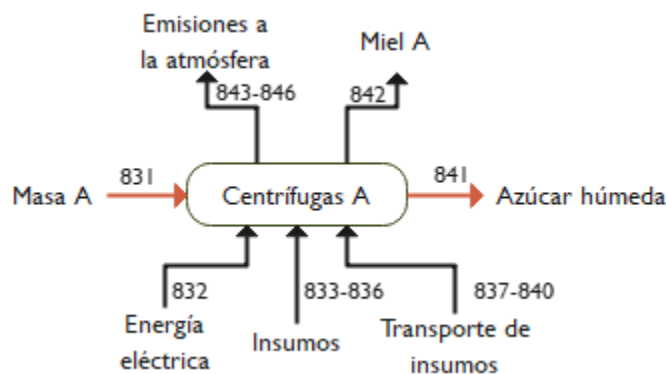


Figura 118. Flujos de entrada y salida de centrifugas A
Fuente: Elaboración propia

Entrada

Masa de A

$$\frac{\text{Masa de A (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Azúcar húmeda (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Miel de A (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 831

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de la centrífuga A se contabilizó mediante la Ecuación 832.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right) * \text{Eficiencia del motor}}$$

Ecuación 832

Insumos

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 833

$$\frac{\text{oxígeno (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de oxígeno (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 834

$$\frac{\text{arandelas (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de placa de acero (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 835

$$\frac{\text{tornillos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de placa de acero (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 836

Transporte de insumos

$$\frac{\text{electrodos transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquirida (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 837

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 838

$$\frac{\text{arandelas transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 839

$$\frac{\text{tornillos transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 840

Salida

Azúcar húmeda

$$\frac{\text{Azúcar húmeda (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \% \text{ rendimiento en templa de A} * \left(\frac{\text{Semilla de B (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Meladura (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} \right)$$

Ecuación 841

Miel de A

$$\frac{\text{Miel de A (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = 100\% - \% \text{ rendimiento en templa de A} * \left(\frac{\text{Semilla de B (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} + \frac{\text{Meladura (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} \right)$$

Ecuación 842

Emisiones por electrodos

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 843

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 844

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 845

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 846

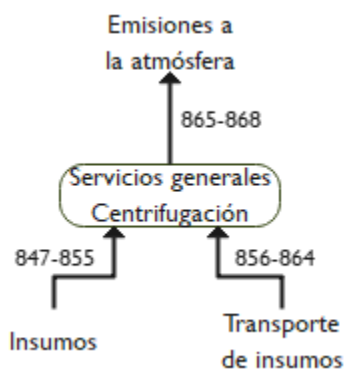


Figura I 19. Flujos de entrada y salida de los servicios generales en centrifugación

Fuente: Elaboración propia

Insumos

$$\frac{\text{placa de acero (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de placa de acero (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 847

$$\frac{\text{cincho (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de cincho (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 848

$$\frac{\text{electrodos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de electrodos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 849

$$\frac{\text{aceites (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de aceites (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 850

$$\frac{\text{oxígeno (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de oxígeno (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 851

$$\frac{\text{gas LP (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de gas LP (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 852

$$\frac{\text{arandela (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de arandela (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 853

$$\frac{\text{tornillos (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de tornillos (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 854

$$\frac{\text{materiales de acero (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de materiales de acero (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 855

Transporte

$$\frac{\text{placa de acero transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{placas adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 856

$$\frac{\text{cinchos transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cinchos adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 857

$$\frac{\text{electrodos transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{electrodos adquirida (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 858

$$\frac{\text{aceites transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{aceites adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 859

$$\frac{\text{oxígeno transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 860

$$\frac{\text{gas LP transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{gas LP adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 861

$$\frac{\text{arandela transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{arandela adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 862

$$\frac{\text{tornillos transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{tornillos adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 863

$$\frac{\text{materiales de acero transportado (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{acero adquirido (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 864

Emisiones por electrodos

$$\frac{\text{emisión de Cr (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Cr}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 865

$$\frac{\text{emisión de Co (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Co}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 866

$$\frac{\text{emisión de Mn (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Mn}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 867

$$\frac{\text{emisión de Ni (g)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \text{Factor de emisión} \left(\frac{\text{g Ni}}{\text{kg electrodo}} \right) * \frac{\text{cantidad de electrodo (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 868

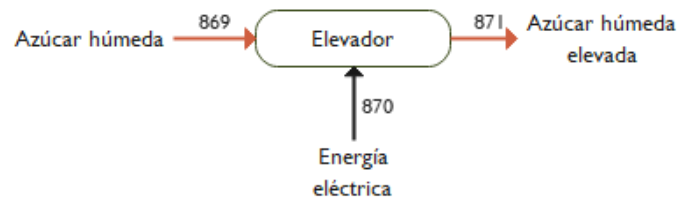


Figura 120. Flujos de entrada y salida del elevador
Fuente: Elaboración propia

Elevador de azúcar

$$\frac{\text{Azúcar húmeda de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Azúcar húmeda de salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 869

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del elevador de azúcar se contabilizó mediante la Ecuación 870.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 870

$$\frac{\text{Azúcar húmeda elevada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Azúcar húmeda de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 871

Sinfín

$$\frac{\text{Azúcar húmeda elevada de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Azúcar húmeda elevada de salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 872

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del sinfín se contabilizó mediante la Ecuación 873.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión } \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}}\right) * \text{horas de funcionamiento } \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}}\right)}{\frac{\text{producción total de azúcar } \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}}\right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 873

$$\frac{\text{Azúcar húmeda elevada transportada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Azúcar húmeda elevada de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 874

Secador

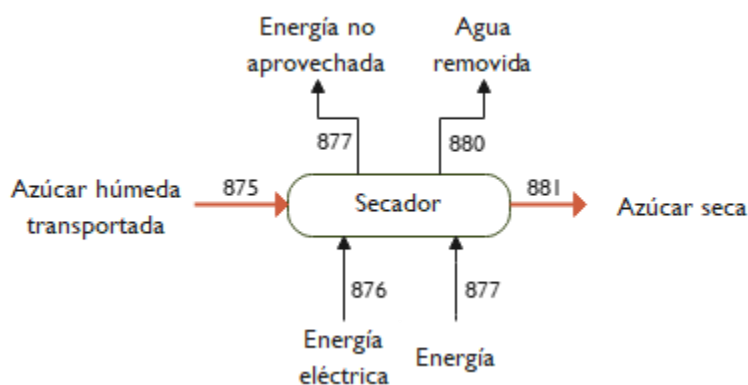


Figura 121. Flujos de entrada y salida del secador

Fuente: Elaboración propia

Entrada

$$\frac{\text{Azúcar húmeda transportada entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Azúcar húmeda transportada de salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 875

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del secador se contabilizó mediante la Ecuación 876.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \right) * \text{horas de funcionamiento} \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}} \right)}{\frac{\text{producción total de azúcar} \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}} \right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 876

Energía perdida

$$\frac{\text{Masa de aire de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{masa de aire entrada (ton)} * \frac{\text{humedad de entrada} - \text{humedad salida} \left(\frac{\text{kg agua}}{\text{kg azúcar}} \right)}{\text{humedad de aire salida} - \text{humedad aire entrada} \left(\frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire seco}} \right)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 877

$$\frac{\text{Energía perdida (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Masa de aire de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} * \text{Entalpía de aire} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right) * \% \text{ pérdida de energía}$$

Ecuación 878

Energía utilizada

$$\frac{\text{Energía consumida (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Energía perdida (MJ)} * \left(\frac{1}{\% \text{ energía perdida}} \right)}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 879

Agua evaporada

$$\frac{\text{Agua evaporada (MJ)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{(\text{agua entrada} + \text{azúcar entrada (ton)}) - (\text{agua salida} + \text{azúcar salida (ton)})}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 880

$$\frac{\text{Azúcar seca de salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Azúcar húmeda transportada entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} - \frac{\text{Agua evaporada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 881



Figura 122. Flujos de entrada y salida del elevador 2
Fuente: Elaboración propia

$$\frac{\text{Azúcar seca de entrada(ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Azúcar seca de salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 882

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento del elevador 2 se contabilizó mediante la Ecuación 883.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión } \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}}\right) * \text{horas de funcionamiento } \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}}\right)}{\frac{\text{producción total de azúcar } \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}}\right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 883

$$\frac{\text{Azúcar seca elevada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Azúcar seca de entrada(ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 884



Figura 123. Flujos de entrada y salida de la zaranda
Fuente: Elaboración propia

$$\frac{\text{Azúcar seca elevada entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Azúcar seca de salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 885

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de la zaranda se contabilizó mediante la Ecuación 886.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión } \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}}\right) * \text{horas de funcionamiento } \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}}\right)}{\frac{\text{producción total de azúcar } \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}}\right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 886

$$\frac{\text{Azúcar zarandeada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Azúcar seca elevada entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 887

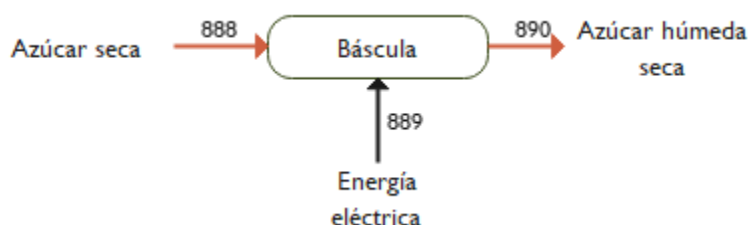


Figura 124. Flujos de entrada y salida de la báscula

Fuente: Elaboración propia

$$\frac{\text{Azúcar zarandeada entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Azúcar zarandeada salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 888

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de la báscula contabilizó mediante la Ecuación 889.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión } \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}}\right) * \text{horas de funcionamiento } \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}}\right)}{\frac{\text{producción total de azúcar } \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}}\right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 889

$$\frac{\text{Azúcar medida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Azúcar zarandeada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 890

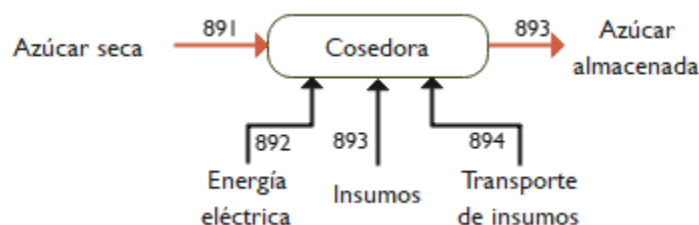


Figura 125. Flujos de entrada y salida de la cosedora
Fuente: Elaboración propia

$$\frac{\text{Azúcar medida de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Azúcar medida de salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 891

La energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de la cosedora se contabilizó mediante la Ecuación 892.

$$\frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Potencia motor (hp)} * \text{Factor de conversión } \left(\frac{\text{kW}}{\text{hp}}\right) * \text{horas de funcionamiento } \left(\frac{\text{horas}}{\text{zafra}}\right)}{\frac{\text{producción total de azúcar } \left(\frac{\text{g}}{\text{zafra}}\right)}{\text{Eficiencia del motor}}}$$

Ecuación 892

Insumos

$$\frac{\text{envase (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de envases (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 893

Transporte

$$\frac{\text{envases transportada (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{envases adquirida (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 894

$$\frac{\text{Azúcar medida de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Azúcar medida de salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 895

$$\frac{\text{Azúcar empacada cocida de salida (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{Azúcar medida de entrada (ton)}}{\text{producción azúcar (g)}}$$

Ecuación 896

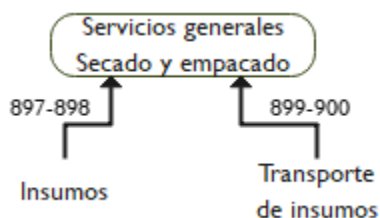


Figura 126. Flujos de entrada y salida de los servicios generales de secado y empaque
Fuente: Elaboración propia

Insumos

$$\frac{\text{oxígeno (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de oxígeno (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 897

$$\frac{\text{gas LP (kg)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{cantidad de gas LP (kg)}}{\text{producción total de azúcar (g)}}$$

Ecuación 898

Transporte

$$\frac{\text{oxígeno transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{oxígeno adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 899

$$\frac{\text{gas LP transportados (kgkm)}}{\text{producción azúcar (g)}} = \frac{\text{gas LP adquiridos (kg)}}{\text{producción de azúcar (g)}} * \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{viaje}} * \text{total de viajes}$$

Ecuación 900