

Tipología de ingenios azucareros por eficiencia en planta basada en pérdidas de sacarosa

Fermín Sandoval-Romero ¹

Miguel Ángel Martínez-Damián ^{2, §}

Ramón Valdivia-Alcalá ¹

J. Reyes Altamirano-Cárdenas ¹

1 Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. (fsandoval.romero@gmail.com; jreyesa@ciestaam.edu.mx; ramvaldi@gmail.com).

2 Colegio de Posgraduados-Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillos, Texcoco, Estado de México. CP. 56264. C

Autor para correspondencia: angel01@colpos.mx

Resumen

La agroindustria azucarera requiere herramientas que permitan comparar el desempeño de los ingenios y focalizar acciones para reducir pérdidas de sacarosa en planta. El objetivo del estudio fue construir una tipología de ingenios azucareros mexicanos con base en indicadores de pérdidas de sacarosa y desempeño de fábrica. La investigación se realizó en México, mediante análisis de información secundaria correspondiente a 46 ingenios observados en 10 zafras (2012/13-2021 y 2022), procesada y sintetizada durante 2025. La base se colapsó a nivel ingenio mediante la mediana por variable y se estandarizó con puntajes Z. Se aplicó análisis de componentes principales para integrar cuatro dimensiones: pérdidas de sacarosa, calidad y potencial tecnológico de la caña y del jugo, extracción de sacarosa a partir del jugo y rendimiento industrial, e intensidad operativa-energética en planta. Con los puntajes dimensionales se estimó un agrupamiento jerárquico (método de Ward y distancia euclídeana) lo que permitió identificar seis tipos de ingenios. Los tipos IV y V concentraron el mejor desempeño integral al combinar alta calidad/potencial y mayor extracción-rendimiento con menor intensidad operativa-energética; destacan Bellavista y Atencingo. Los tipos I y II mostraron rezagos asociados a baja calidad/potencial y menor extracción-rendimiento, el tipo VI presentó pérdidas e intensidad operativa-energética altas pese a potencial relativamente alto y el tipo III correspondió al ingenio El Carmen como caso atípico con pérdidas altas de sacarosa. La principal conclusión es que la tipología permitió orientar estrategias diferenciadas de mejora y seguimiento del desempeño en planta de los ingenios de la agroindustria azucarera de México.

Palabras clave:

agrupamiento jerárquico, análisis de componentes principales, consumo específico de energía, recuperación de sacarosa.

Introducción

La agroindustria de la caña de azúcar es una actividad estratégica en México por su impacto económico y por el empleo que sostiene en las regiones donde se desarrolla. En términos territoriales, la agroindustria cañera tiene relevancia económica en 16 entidades federativas lo que evidencia su papel como eje de articulación productiva y regional (Sandoval-Romero *et al.*, 2025).

En México, en la zafra 2024-2025 se industrializaron 736 486 ha, se molieron 45.75 millones de toneladas de caña bruta y se obtuvo una producción de azúcar física de 4.77 millones de toneladas, con un indicador de azúcar recuperable base estándar (Karbe) promedio nacional de 112.7 kg t⁻¹ de caña neta, el cual sintetiza el potencial azucarero de la caña y su aprovechamiento industrial (UNC-CNPR, 2025).

A pesar de esta escala, el desempeño del sector depende en gran medida de la capacidad de los ingenios para convertir el potencial azucarero de la caña en azúcar recuperada, lo cual está fuertemente condicionado por pérdidas de sacarosa ocurridas antes y durante el proceso industrial (Solomon, 2009; Broadfoot, 2020).

En la fase previa a la molienda, la literatura reciente documenta que los retrasos cut-to-crush y el deterioro postcosecha provocan pérdidas de sacarosa y reducciones en la recuperación industrial, afectando tanto el rendimiento como la calidad del proceso (Solomon, 2009).

En planta, una ruta crítica de pérdida está asociada al agotamiento en miel final y se ha encontrado, también, que la sacarosa residual puede constituir la mayor pérdida del proceso de fabricación del azúcar, por lo que su monitoreo y control son determinantes para la eficiencia global del ingenio (Broadfoot, 2020).

En México, también existe evidencia de heterogeneidad significativa entre ingenios en eficiencia técnica, productividad y desempeño operativo, lo que sugiere que no todos convierten con la misma efectividad el potencial de la caña en producto final (Santiago-Zarate *et al.*, 2021; Valdivia-Alcala *et al.*, 2022).

Esta heterogeneidad puede amplificarse por condiciones externas: por ejemplo, se ha mostrado que variables climáticas y económicas influyen en el rendimiento de sacarosa en caña a nivel ingenio, afectando la base misma del aprovechamiento industrial (Everingham *et al.*, 2002; Sandoval-Romero *et al.*, 2025).

En este estudio, la eficiencia en planta se entiende en sentido operativo-industrial, no como estimación de eficiencia técnica, asignativa, energética, parcial o global mediante modelos de frontera, sino como la capacidad del ingenio para maximizar la recuperación de sacarosa y minimizar sus pérdidas totales y por rutas (bagazo, miel final, cachaza e indeterminadas) en interacción con el desempeño de la extracción y recuperación y la estabilidad operativa del proceso (Solomon, 2009; Broadfoot, 2020).

El objetivo del estudio fue construir una tipología de ingenios azucareros con el propósito de caracterizar la eficiencia en planta asociada a pérdidas de sacarosa, integrando indicadores de pérdidas totales y por rutas de extracción-recuperación y de operación-energía para identificar aquellos ingenios con un perfil crítico.

Materiales y métodos

La investigación es de tipo observacional, no experimental y se utilizó información secundaria de ingenios azucareros. La base original corresponde a un panel longitudinal retrospectivo de 46 ingenios a lo largo de 10 zafas (2012-2013 y 2021-2022). Para el análisis de tipologías, la información se agregó por ingenio mediante la mediana de 10 zafas generando una muestra transversal (n= 46) y sobre la cual se aplicó el análisis de componentes principales y el enfoque de clustering jerárquico.

Las principales fuentes de información fueron UNC-CNPR (2025); CNIAA (2024). Las corridas estadísticas se realizaron con Python 3 dentro de un entorno tipo Jupyter Notebook, utilizando pandas/NumPy para la depuración y agregación de datos y SciPy/scikit-learn/matplotlib para el análisis multivariante, el agrupamiento jerárquico y la generación de figuras (McKinney, 2010).

Como se ha mencionado, el método utilizado fue el enfoque de componentes principales, este método multidimensional permite reducir un conjunto de indicadores correlacionados a un menor número de ejes ortogonales que concentran la mayor variación de la información, facilitando la interpretación multivariada y de esta forma evitar redundancias.

En la agricultura, el análisis de componentes principales se ha utilizado en forma recurrente para resumir la información técnica (por ejemplo, la construcción de conjuntos mínimos de variables e índices compuestos) y para apoyar la clasificación de unidades productivas o tecnológicas, cuando existen múltiples indicadores de desempeño, para poder realizar el agrupamiento jerárquico y dendrogramas para identificar grupos con perfiles contrastantes a partir de puntajes o componentes retenidos (Núñez-Peñaloza *et al.*, 2023; Álvarez *et al.*, 2024).

Como en Kaur *et al.* (2021) en este estudio se realizó un análisis exploratorio previo al clustering utilizando los puntajes factoriales para formar conglomerados estables y comparables y, consecuentemente poder representarlos mediante el dendrograma jerárquico para su lectura y poder identificar los perfiles respectivos de las unidades de estudio.

En dicho análisis preliminar también se seleccionó un subconjunto de indicadores alineados con el objetivo del estudio, integrando variables de pérdidas de sacarosa (total y por rutas), de calidad y potencial azucarero, de extracción y recuperación y operación y energía. Todas las variables cuantitativas se estandarizaron mediante puntajes Z (media cero y desviación estándar de uno) para evitar sesgos por diferencias de escala entre ingenios y unidades de medición.

El análisis de componentes principales se estimó por bloques conceptuales sobre la matriz de correlaciones y su adecuación se evaluó mediante el estadístico Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), prueba de esfericidad de Bartlett y varianza explicada del primer componente. Los valores fueron: D1, KMO= 0.225, Bartlett $p < 0.001$ y PC1= 51.576%; D2, KMO= 0.762, Bartlett $p < 0.001$ y PC1= 88.438%; D3, KMO= 0.654, Bartlett $p < 0.001$ y PC1= 63.665%; y D4, KMO= 0.467, Bartlett $p = 0.055$ y PC1= 37.677%.

Con base en estos resultados y en la interpretación tecnológica de cada bloque, se retuvo el primer componente como indicador de síntesis. Para la clasificación y definición del número de grupos se realizó con base en la estructura del dendrograma y un criterio interno de separación (Silhouette).

La representación matemática exhaustiva del método de componentes principales aplicado a la agricultura se presenta en Júdez (1989) y de manera formal en Rencher y Christensen (2012); Jolliffe y Cadima (2016). En las corridas preliminares realizadas en python se identificó que el desempeño de la eficiencia en fábrica puede sintetizarse en cuatro dimensiones latentes.

La primera dimensión (D1) se asocia a la extracción y calidad del jugo y su interpretación es que la respectiva unidad de estudio tendrá un mejor desempeño si la extracción y la calidad del jugo son más altas. La segunda dimensión (D2) corresponde a las pérdidas de sacarosa (control de pérdidas) el peor desempeño de un ingenio puede ocurrir cuando aumentan pérdidas en bagazo, miel y cachaza.

La dimensión tres (D3) se asocia a la eficiencia energética específica (vapor-electricidad-fósiles) y se interpreta señalando que un ingenio tiene un mejor desempeño cuando baja el consumo específico de vapor, electricidad y combustibles fósiles. La dimensión cuatro (D4) se define como la estabilidad operativa y utilización de capacidad y su lectura es que se tiene un mejor desempeño cuando disminuyen paros y aumenta el ritmo efectivo de molienda.

En el Cuadro 1 se da la definición de las variables sintetizadas en la respectiva dimensión o componente principal.

Cuadro 1. Definición de dimensiones y variables de la investigación.

Variable	Descripción de las variables	Unidades
D1 - PSATO	Perdidas de sacarosa total	(%)
D1 - PRSAB	Perdidas de sacarosa en bagazo	(%)
D1 - PSMF	Perdidas de sacarosa miel final	(%)
D1 - PSCA	Perdida de sacarosa en cachaza	(%)
D1 - PSIND	Perdida de sacarosa indeterminadas	(%)
D2 - KRCN	Kilos de azúcar recuperable base estándar caña neta	(kg t ⁻¹)
D2 - KRCB	Kilos de azúcar recuperable base estándar caña bruta	(kg t ⁻¹)
D2 - SNCA	Sacarosa en caña	(%)
D2 - SJUMX	Sacarosa jugo mezclado	(%)
D2 - PAJM	Pureza aparente jugo mezclado	(%)
D2 - BXJM	Brix jugo mezclado	(%)
D3 - XPOLC	Extracción POL por ciento POL caña	(%)
D3 - EXJMZ	Extracción jugo mezclado	(%)
D3 - ER125C	Extracción reducida a 12.5% en caña	(%)
D3 - RENFA	Rendimiento de fábrica	(t)
D4 - TPTO	Tiempo perdido total	(%)
D4 - CVXTC	Consumo de vapor por tonelada de caña	(t)
D4 - CELXT	Consumo de electricidad por tonelada de caña	(kWh)
D4 - PCFTC	Petróleo consumido en fábrica por tonelada de caña	(L)

Elaborado con base en las corridas estadísticas de Python 3.

Resultados y discusión

Como se mencionó anteriormente, en el presente estudio se distinguieron dos etapas analíticas que no deben confundirse. En la primera etapa las variables industriales se agruparon en cuatro dimensiones conceptuales (D1-D4) y dentro de cada dimensión, se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) para obtener un indicador de síntesis (el primer componente, PC1) que resume la información de las variables de esa dimensión.

Este paso no se forman grupos pues únicamente se reduce la dimensionalidad generando cuatro puntajes (D1-PC1, D2-PC1, D3-PC1, D4-PC1) que representan el perfil de cada ingenio.

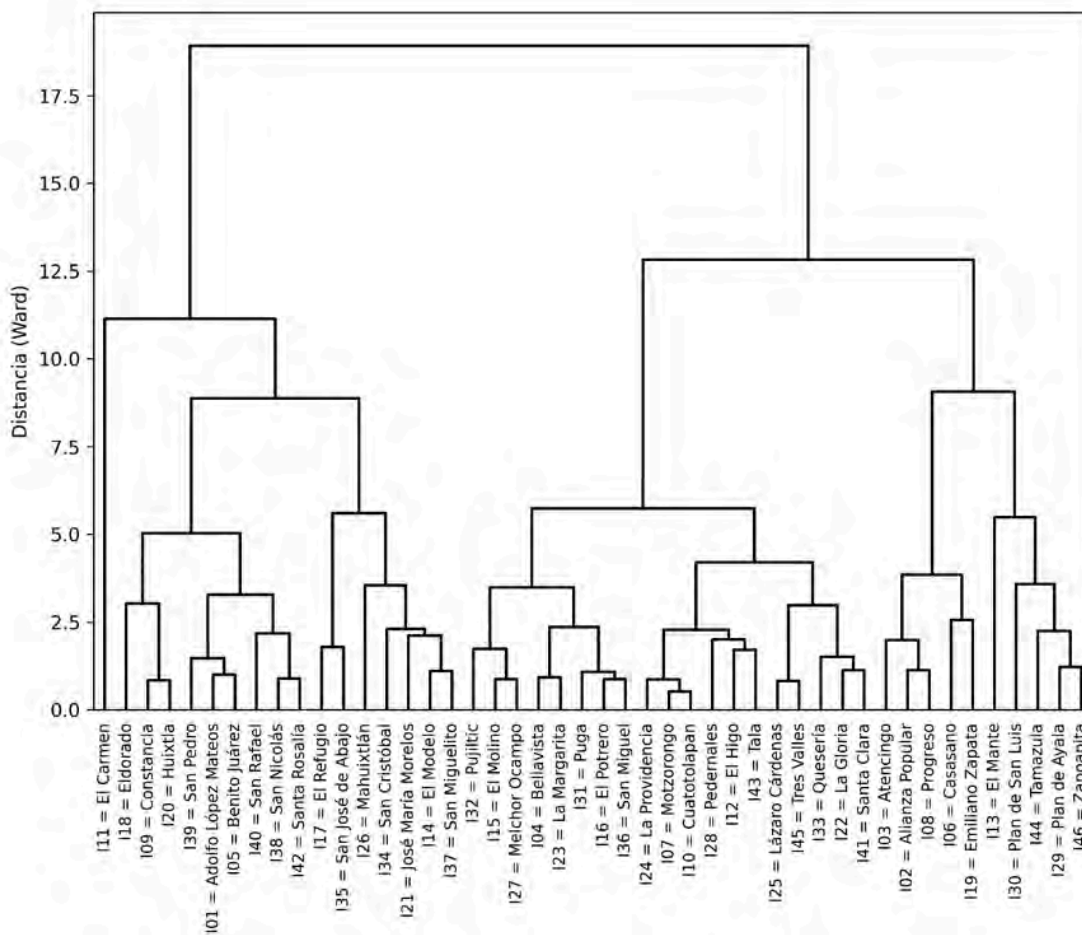
En una segunda etapa, esos cuatro puntajes se utilizaron como insumos para un análisis de conglomerados jerárquicos, método de Ward, con el cual se construyó el dendrograma y se definió el número de grupos mediante un corte del árbol jerárquico lo cual proporcional la tipología final de ingenios. La validación interna del agrupamiento se realizó comparando soluciones de $k=2$ a $k=6$ mediante tres índices: Silhouette, Calinski-Harabasz y Davies-Bouldin.

Para la solución de seis grupos se obtuvo Silhouette= 0.2762, Calinski-Harabasz= 22.2514 y Davies-Bouldin= 0.8697, esta solución presentó el mayor valor de Calinski-Harabasz y el menor valor de Davies-Bouldin dentro del rango evaluado, aunque el mayor Silhouette correspondió a $k=2$. Se retuvo $k=6$ porque ofreció mayor resolución tipológica, coherencia con el dendrograma e interpretación tecnológica de los perfiles de ingenios.

Las diferencias entre tipos se contrastaron mediante Kruskal-Wallis sobre los puntajes dimensionales, debido al tamaño desigual de los grupos. Se observaron diferencias significativas en D1 ($H=19.015$; $p=0.0019$), D2 ($H=36.502$; $p<0.001$), D3 ($H=23.102$; $p<0.001$) y D4 ($H=18.656$; $p=0.0022$), lo que respalda que los tipos identificados presentan perfiles estadísticamente diferenciables.

De esta forma se identificaron seis tipos de ingenios azucareros donde cada tipo representa un perfil tecnológico distintivo asociado a la combinación de pérdidas de sacarosa, calidad/potencial, extracción-rendimiento y operación-energía, lo que permite comparar y caracterizar el desempeño industrial entre grupos. Estos seis grupos se pueden observar en el dendrograma como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Tipología de ingenios azucareros de México con puntajes dimensionales derivados del análisis de componentes principales.



Ingenios tipo I

Este tipo de ingenios se caracteriza por tener pérdidas de sacarosa (D1) cercanas a valores medios-altos, baja calidad y bajo potencial tecnológico de la caña y del jugo (D2), menor extracción de sacarosa a partir del jugo y rendimiento industrial (D3) y una intensidad operativa y energética en planta (D4) cercana al promedio. En este grupo se localizan siete ingenios, entre los que destacan, El Modelo (I14) y El Refugio (I17).

En este estudio la expresión 'cercano al promedio' indica que el puntaje de la dimensión se ubica alrededor del valor central del conjunto de ingenios (scores estandarizados), sin diferenciarse marcadamente en sentido alto o bajo.

Ingenios tipo II

Este tipo de ingenios se caracteriza por tener pérdidas de sacarosa (D1) relativamente bajas, baja calidad y bajo potencial tecnológico de la caña y del jugo (D2), niveles de extracción de sacarosa a partir del jugo y rendimiento industrial (D3) cercanos al valor típico del conjunto y una intensidad operativa y energética en planta (D4) relativamente alta. En este grupo se localizan nueve ingenios, entre los que destacan; por ejemplo, Benito Juárez (I05) y Huixtla (I20).

Ingenios tipo III

Este tipo de ingenios se caracteriza por tener pérdidas de sacarosa (D1) muy altas, muy baja calidad y muy bajo potencial tecnológico de la caña y del jugo (D2), menor extracción de sacarosa a partir del jugo y rendimiento industrial (D3) marcadamente bajos, y una intensidad operativa y energética en planta (D4) muy alta.

En este grupo se localiza un solo ingenio, El Carmen (I11), lo que indica un comportamiento atípico respecto al resto de los ingenios analizados. Este perfil refleja una condición operativa desfavorable dentro de la tipología estimada, por lo que debe interpretarse como un grupo con mayores restricciones técnico-industriales relativas, no como una predicción de cierre o salida del mercado.

Ingenios tipo IV

Este tipo de ingenios se caracteriza por tener pérdidas de sacarosa (D1) relativamente bajas, alta calidad y alto potencial tecnológico de la caña y del jugo (D2), mayor extracción de sacarosa a partir del jugo y rendimiento industrial (D3), y una intensidad operativa y energética en planta (D4) relativamente baja. En este grupo se localizan diecinueve ingenios, entre los que destacan; por ejemplo, Bellavista (I04) y Motzorongo (I07).

Ingenios tipo V

Este tipo de ingenios se caracteriza por tener pérdidas de sacarosa (D1) cercanas al valor típico del conjunto, muy alta calidad y muy alto potencial tecnológico de la caña y del jugo (D2), mayor extracción de sacarosa a partir del jugo y rendimiento industrial (D3), y una intensidad operativa y energética en planta (D4) relativamente baja. En este grupo se localizan cinco ingenios, entre los que destacan; por ejemplo, Alianza Popular (I02) y Atencingo (I03).

Ingenios tipo VI

Este tipo de ingenios se caracteriza por tener pérdidas de sacarosa (D1) muy altas, alta calidad y alto potencial tecnológico de la caña y del jugo (D2), niveles de extracción de sacarosa a partir del jugo y rendimiento industrial (D3) cercanos al valor típico del conjunto y una intensidad operativa y energética en planta (D4) muy alta. En este grupo se localizan cinco ingenios, entre los que destacan; por ejemplo, El Mante (I13) y Plan de Ayala (I29).

Discusión

De esta forma se puede afirmar que en conjunto, la tipología evidencia un gradiente claro de desempeño: los ingenios tipo IV y tipo V concentran el mejor desempeño integral, al combinar alta calidad y potencial tecnológico (D2) con mayor extracción de sacarosa a partir del jugo y rendimiento industrial (D3) y una intensidad operativa y energética (D4) relativamente baja; en contraste, los tipos I y II reflejan condiciones menos favorables por su baja calidad/potencial

(D2) y menor extracción-rendimiento (D3), mientras que el tipo III representa un caso atípico con valores extremos en varias dimensiones y el tipo VI sugiere un patrón de altas pérdidas (D1) y alta intensidad operativa (D4) pese a mantener un potencial (D2) relativamente alto.

La tipología obtenida a partir de los puntajes dimensionales (D1-D4) y su posterior agrupamiento jerárquico permite interpretar el desempeño fabril como combinaciones tecnológicas y no como indicadores aislados, lo cual es especialmente útil para asesoría y toma de decisiones en ingenios porque reduce la ambigüedad típica de tableros con decenas de variables (Adolfsson *et al.*, 2019; LaFevor, 2022).

En términos metodológicos, el uso de un método jerárquico que minimiza la varianza intragrupo facilita reconocer 'saltos' tecnológicos entre conjuntos de ingenios, y el apoyo con un criterio interno de separación como la silueta aporta evidencia cuantitativa de que los grupos no son arbitrarios, sino relativamente cohesivos y separables.

Esta lógica es consistente con los fundamentos clásicos del agrupamiento jerárquico de Ward y la validación por siluetas, ampliamente usados para justificar soluciones de clúster en aplicaciones multivariadas (LaFevor, 2022).

Desde el punto de vista tecnológico, la dimensión de pérdidas de sacarosa (D1) y la de calidad/potencial de caña-jugo (D2) suelen reflejar procesos que inician antes de la fábrica y se amplifican dentro de ella.

La evidencia internacional muestra que los retrasos entre cosecha y molienda (harvest-to-crush/cut-to-crush) aceleran la degradación de sacarosa y deterioran la calidad del jugo, afectando tanto el rendimiento recuperable como la estabilidad del proceso industrial (Sibomana *et al.*, 2016).

En esa lógica, los grupos con baja calidad/potencial y pérdidas más altas pueden interpretarse como casos donde el problema no es únicamente 'operación de planta', sino una combinación de logística/abasto (tiempos), manejo de materia prima y control de pérdidas por rutas.

Esto justifica que, en la discusión, no se plantee una sola receta, sino estrategias diferenciadas por tipo: en algunos ingenios la prioridad será 'recuperar potencial' (mejorar calidad/tiempos/condición de caña y jugos), mientras que en otros será 'cerrar pérdidas' en puntos específicos del proceso (bagazo, cachaza, miel final e indeterminadas).

En relación con la dimensión de extracción de sacarosa a partir del jugo y rendimiento industrial (D3), la literatura reciente enfatiza que la eficiencia de extracción no es solo cuestión de 'capacidad instalada', sino de preparación de caña, condición mecánica y parámetros de operación que determinan la liberación de jugo y la recuperación de sacarosa con un costo energético razonable.

En particular, se ha documentado que el nivel de preparación/fragmentación de la caña (preparation index) se asocia con cambios medibles en propiedades mecánicas del material y con incrementos en la eficiencia de extracción, lo que vuelve este punto una palanca técnica clara para ingenios donde D3 aparece rezagada (Wibowo *et al.*, 2025).

Por ello, cuando un tipo presenta alta calidad/potencial (D2) pero extracción/rendimiento moderados o bajos (D3), la interpretación más útil para el lector aplicado es una 'brecha de conversión' interna: el ingenio tiene con qué, pero no lo convierte de forma efectiva; ahí es donde tienen sentido auditorías de preparación de caña, control de imbibición, condiciones de molienda y control de extracción.

Respecto a la dimensión de intensidad operativa-energética (D4), su lectura práctica es que no basta con 'producir'; importa cómo se produce: con paros, inestabilidad, consumo específico elevado de vapor/electricidad/combustibles o con operación estable y eficiente.

En fábricas azucareras se ha demostrado que los análisis energía-exergía permiten identificar pérdidas termodinámicas y oportunidades de optimización asociadas principalmente al uso de vapor, integración térmica y desempeño de equipos (incluida cogeneración), lo cual ayuda a explicar por qué algunos ingenios pueden tener desempeño aceptable en extracción, pero penalizarse por alta intensidad energética (Taner y Sivrioglu, 2015).

Además, comparaciones internacionales de desempeño energético en la industria de caña muestran brechas relevantes entre ingenios 'tradicionales' y 'modernos', reforzando la idea de que los clústeres pueden interpretarse como escalones tecnológicos (no solo 'grupos estadísticos') (Birru *et al.*, 2019).

Finalmente, un aporte central del estudio es que la tipología integra en un solo esquema calidad/potencial, pérdidas, extracción/rendimiento e intensidad operativa-energética, lo que vuelve posible priorizar acciones con lógica de 'cuello de botella dominante': i) si el rezago está en D2/D1, el foco es materia prima, tiempos y control de pérdidas; ii) si el rezago está en D3, el foco es preparación y recuperación industrial; iii) si el rezago está en D4, el foco es estabilidad operativa e integración energética; y iv) si un ingenio se comporta como atípico, la recomendación razonable es un diagnóstico específico antes de compararlo contra promedios sectoriales.

Esta forma de lectura es coherente con el objetivo aplicado del dendrograma: no 'etiquetar por etiquetar', sino orientar rutas de mejora replicables por tipo a partir de patrones tecnológicos observables.

Conclusiones

En el estudio se ha encontrado que es posible clasificar a los ingenios en una tipología operativa de seis tipos, construida a partir de la combinación de pérdidas de sacarosa, calidad y potencial tecnológico de la caña y del jugo, extracción de sacarosa a partir del jugo y rendimiento industrial, así como intensidad operativa-energética en planta.

En conjunto, la tipología reveló un gradiente claro de desempeño, en el cual los tipos IV y V concentraron el comportamiento más favorable al asociar alta calidad/potencial (D2) con mayor extracción y rendimiento industrial (D3) y una intensidad operativa-energética (D4) relativamente baja, dentro de estos tipos de mejor desempeño se ubican ingenios representativos como Bellavista (I04) y Atencingo (I03).

En contraste, los tipos I y II se caracterizaron por condiciones menos favorables vinculadas principalmente a baja calidad/potencial (D2) y menor extracción y rendimiento industrial (D3), lo que sugiere priorizar estrategias orientadas a mejorar la base tecnológica relacionada con la calidad de entrada y la recuperación industrial.

El tipo VI destacó por presentar altas pérdidas de sacarosa (D1) y alta intensidad operativa-energética (D4) pese a mantener un potencial relativamente alto (D2), lo que apunta a una brecha de conversión interna en planta y a oportunidades de mejora en control de pérdidas y estabilidad operativa.

Finalmente, el tipo III, correspondiente al ingenio El Carmen, se identificó como un caso atípico (un solo ingenio) con valores extremos en varias dimensiones, lo que respalda la conveniencia de un diagnóstico específico. En términos aplicados, esta tipología constituye un insumo diagnóstico para ordenar la comparación técnico-industrial entre ingenios e identificar áreas potenciales de mejora; sin embargo, la definición de estrategias específicas requiere información adicional de gestión, costos, inversión y condiciones regionales.

Bibliografía

- 1 Adolfsson, A.; Ackerman, M. and Brownstein, N. C. 2019. To cluster, or not to cluster: an analysis of clusterability methods. *Pattern Recognition*. 88(4):13-26. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2018.10.026>.
- 2 Alvarez, S.; Timler, C. J.; Michalscheck, M.; Paas, W.; Descheemaeker, K.; Tittonell, P.; Andersson, J. A. and Groot, J. C. J. 2018. Capturing farm diversity with hypothesis-based typologies: an innovative methodological framework for farming system typology development. *PLoS One*. 13(5):e0194757. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194757>.

- 3 Birru, E.; Erlich, C. and Martin, A. 2019. Energy performance comparisons and enhancements in the sugar cane industry. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 9(2):267-282. <https://doi.org/10.1007/s13399-018-0349-z>.
- 4 Broadfoot, R. 2020. Benchmarking and improving sugar recovery from final molasses. *Sugar Industry/Zuckerindustrie*. 145(3):166-171. <https://doi.org/10.36961/si24157>.
- 5 CNIAA. 2024. Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcoholera. Manual azucarero mexicano 2024- Manual/Libro digital. Compañía Editorial del Manual Azucarero. <https://es.scribd.com/document/759734142/Libro-Digital-Manual-Azucarero-Edicion-2024>.
- 6 Everingham, Y. L.; Muchow, R. C.; Stone, R. C.; Inman-Bamber, N. G.; Singels, A. and Bezuidenhout, C. N. 2002. Enhanced risk management and decision-making capability across the sugarcane industry value chain based on seasonal climate forecasts. *Agricultural Systems*. 74(3):459-477. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00050-1).
- 7 Jolliffe, I. T. and Cadima, J. 2016. Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 374(2065):20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>.
- 8 Júdez, A.; L. 1989. Técnicas de análisis de datos multidimensionales: bases teóricas y aplicaciones en agricultura. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Centro de Publicaciones. Madrid, España. 253-301 pp.
- 9 LaFevor, M. C. 2022. Characterizing agricultural diversity with policy-relevant farm typologies in Mexico. *Agriculture*. 12(9):1-16. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091315>.
- 10 McKinney, W. 2010. Data structures for statistical computing in python. In: proceedings of the 9th python in Science Conference (SciPy 2010). 56-61 pp.
- 11 Núñez-Peñaloza, J. L.; Pérez-Nieto, J. y Prado-Hernández, J. V. 2023. Análisis de indicadores e índices de calidad de suelos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 14(6):e3148. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i6.3148>.
- 12 Rencher, A. C. and Christensen, W. F. 2012. Methods of multivariate analysis. 3rd. Edition. John Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118391686>.
- 13 Sandoval-Romero, F.; Montiel-Batalla, B. M.; Garay-Jácome, Á. S. y Blas-Cortes, J. 2025. Identificación de los ingenios azucareros de mayor eficiencia técnica relativa en México. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*. 16(3):e3611. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i3.3611>.
- 14 Santiago-Zárate, I. M.; Martínez-Damián, M. Á.; Cuevas-Alvarado, C. M.; Valdivia-Alcalá, R.; García-Hernández, M. I. y Hernández-Toscano, J. 2021. Productividad y cambio tecnológico en la agroindustria de la caña de azúcar en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 12(6):1005-1017. Doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i6.2692>.
- 15 Sibomana, M. S.; Sobratee, N.; Workneh, T. S. and Bezuidenhout, C. 2016. Post-harvest changes in sugarcane during harvest-to-crush delays in the KwaZulu-Natal Midlands. *International Sugar Journal*. 118(1410):442-449. <https://www.researchgate.net/publication/305006068-Post-harvest-changes-in-sugarcane-during-harvest-to-crush-delays-in-the-Kwazulu-Natal-Midlands>.
- 16 Solomon, S. 2009. Post-harvest deterioration of sugarcane. *Sugar Tech*. 11(2):109-123. <https://doi.org/10.1007/s12355-009-0018-4>.
- 17 Taner, T. and Sivrioglu, M. 2015. Energy-exergy analysis and optimization of a model sugar factory in Turkey. *Elsevier*. 93(Part 1):641-654. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015Ene....93..641T/abstract>.
- 18 UNC-CNPR. 2025. Unión Nacional de Cañeros, AC y Confederación Nacional de Propietarios Rurales. Estadísticas de la agroindustria de la caña de azúcar 2016-2025. Ciudad de México, México. 85-415 pp.

- 19 Valdivia-Alcalá, R.; Cuevas-Alvarado, C. M.; Vázquez-Muñoz, J. S.; García-Hernández, M. I.; Santiago-Zárate, I. M. y Garay-Jácome, Á. S. 2022. Análisis de la eficiencia y retornos de escala de los ingenios azucareros de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 13(1):141-153. Doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2639>.
- 20 Wibowo, A.; Nugroho, G. and Muflikhun, M. A. 2025. Complex evaluation process on the sugarcane juice harvesting by using preparation index related to the mechanical properties: a key foundation for modeling and improved milling efficiency. *Food and Bioproducts Processing*. 153(5)22-32. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2025.05.011>.



Tipología de ingenios azucareros por eficiencia en planta basada en pérdidas de sacarosa

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
ISSN (electronic): 2007-9230
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (México)

Article/Issue Information
Date received: 01 May 2026
Date accepted: 01 August 2026
Publication date: 01 September 2026
Volume: 17
Issue: 6
Electronic Location Identifier: e4206
DOI: 10.29312/remexca.v17i6.4206

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

agrupamiento jerárquico
análisis de componentes principales
consumo específico de energía
recuperación de sacarosa

Counts

Figures: 1

Tables: 1

Equations: 0

References: 20