

Valorización Energética del Bagazo de Agave en la Industria Tequilera Bajo un Enfoque de Economía Circular

Martha L. Silva-Flores ^{1,*}, César Octavio Macías-González ²

¹ Departamento de Economía, Administración y Mercadología, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, Tlaquepaque, Jalisco, México.

² Dirección de Ingeniería en Operaciones y Servicios para Norte y Sudamérica, Forvia Hella, Tlaquepaque, Jalisco, México.

* Autor de correspondencia: pamcar@iteso.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 15 de abril de 2026

Aceptado: 30 de junio de 2026

Publicado: 24 de agosto de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.713>

Resumen: Este artículo presenta un caso práctico de divulgación científica sobre la valorización energética del bagazo de agave en la industria tequilera de Jalisco, México. Se analiza la viabilidad de transformar este subproducto, generado durante la molienda de las piñas de agave, en pellets de biomasa con un poder calorífico de 17 a 19 MJ/kg, capaces de sustituir al combustóleo en calderas industriales. El caso de estudio se centra en la empresa Biointra Renovables, a partir de siete entrevistas semiestructuradas y visitas a tequileras de la región. Los datos del caso indican que, en las condiciones analizadas, la sustitución de combustóleo por pellets de biomasa puede reducir los costos de combustible en torno al 50% y las emisiones directas de CO₂ vinculadas a la generación de vapor en aproximadamente un 37% respecto al uso de combustóleo, además de generar 39 empleos directos por planta peletizadora. El presente trabajo adapta y divulga los hallazgos del estudio de Macías-González (2023), enmarcados en los principios de la economía circular y de la economía del rendimiento.

Palabras clave: economía circular, biomasa, bagazo de agave, industria tequilera, sustentabilidad

Introducción

La producción de tequila constituye un sector emblemático del estado de Jalisco, México, cuya expansión sostenida ha intensificado los desafíos relacionados con la gestión de residuos sólidos y la huella de carbono de sus procesos industriales. En 2020, la industria tequilera demandó 1,407,000 toneladas de agave; dado que el bagazo representa aproximadamente el 40% del peso total del agave procesado, ese año se generaron cerca de 562,800 toneladas de bagazo sobre base húmeda (Consejo Regulador del Tequila [CRT], 2019; Macías-González, 2023). Ante este volumen, la economía circular se ha posicionado como un paradigma orientado a desacoplar el crecimiento económico del consumo de recursos finitos, manteniendo los materiales en su máxima utilidad y valor (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Si bien el bagazo de agave puede aprovecharse en compostaje, ensilado, nutrición animal, sustratos, tableros de fibra u obtención de compuestos bioquímicos (Kumar & Ram, 2021), su valorización energética mediante la conversión en pellets de biomasa representa una ruta con potencial industrial particularmente relevante para la descarbonización del sector. La dependencia del combustóleo y el gas natural como fuentes de energía para las calderas tequileras se contraponen con los compromisos internacionales derivados de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente los ODS 7 (energía asequible y no contaminante), 9 (industria, innovación e infraestructura) y 13 (acción por el clima) (Naciones Unidas, 2015).

El presente artículo adapta y divulga los hallazgos del trabajo de obtención de grado de Macías-González (2023), que analizó la viabilidad de incorporar el bagazo de agave como fuente de biomasa para calderas ecológicas en la industria tequilera, tomando como caso de estudio a la empresa Biointra Renovables, pionera en el tratamiento de residuos agroindustriales en la región de Tequila, Jalisco. La investigación se enmarca en la economía del rendimiento (Stahel, 2010) y los modelos de negocio circulares (Bocken *et al.*, 2016), con el propósito de evidenciar cómo esta reconversión energética puede generar beneficios simultáneos en las dimensiones social, ambiental y económica (Elkington, 1997). El aporte específico de este manuscrito consiste en articular esos hallazgos con marcos teóricos de economía circular y en analizar su potencial de replicabilidad.

Desarrollo

Economía circular y valorización energética de residuos agroindustriales

La economía circular se define como un sistema económico restaurativo y regenerativo por diseño, que opera a través de dos ciclos: el ciclo técnico, orientado a la reutilización y remanufactura de productos, y el ciclo biológico, mediante el cual los materiales biodegradables se reincorporan al entorno natural (Ellen MacArthur Foundation, 2013). En la industria tequilera, el ciclo biológico es el más relevante: el bagazo de agave, en lugar de disponerse como residuo, puede reincorporarse al sistema productivo como fuente de energía térmica. La economía del rendimiento complementa este enfoque al proponer la extensión del valor de los recursos mediante su reutilización, generando valor económico a partir del uso intensivo del conocimiento (Stahel, 2010).

El modelo de jerarquía de gestión de residuos de Baskar *et al.* (2022) implica reducir, reutilizar, reciclar, recuperar energía y desechar, lo que sitúa la recuperación energética como una alternativa preferible a la disposición final. En este marco, la combustión de biomasa constituye una tecnología termoquímica ampliamente validada para la oxidación de materia orgánica y la generación de calor (Nussbaumer, 2003). El bagazo de agave, con un contenido de carbono suficiente y un poder calorífico de 17 a 19 MJ/kg (comparable al del combustóleo) resulta un insumo idóneo para la producción de pellets de biomasa que alimenten calderas ecológicas (Macías-González, 2023).

Proceso de conversión del bagazo de agave en pellets

La conversión del bagazo en pellets de biomasa comprende las siguientes etapas: (1) acopio del bagazo proveniente de las tequileras, que llega con una humedad del 50% al 70% dependiendo del método de extracción de azúcares; (2) presecado mediante prensado para reducir el exceso de agua; (3) reducción de tamaño en molino de navajas para homogeneizar la fibra; (4) secado definitivo en trommel de tres pasos con aire caliente hasta alcanzar una humedad del 10% al 15%; (5) peletizado mediante rodillos cilíndricos que comprimen la biomasa a través de una matriz anular con orificios de 6 a 8 mm, donde la lignina natural del agave actúa como aglutinante; (6) enfriamiento y clasificación del pellet; y (7) almacenamiento en condiciones controladas de humedad para su posterior suministro a calderas (Macías-González, 2023). La Figura 1 ilustra la cadena de vida del tequila y los puntos de circularidad en los que el bagazo se reincorpora al ciclo productivo.

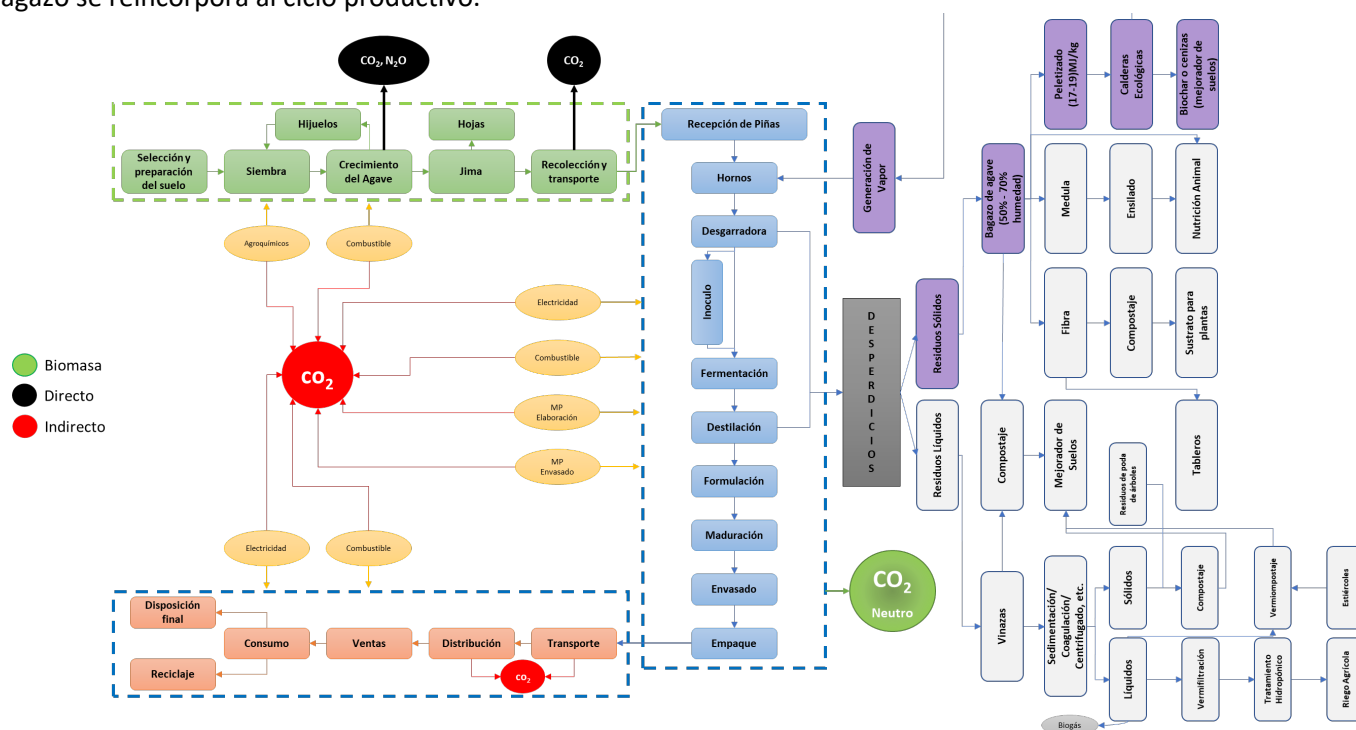


Figura 1. Cadena de vida del tequila y circularidad en términos de utilización de residuos como fuente de biomasa para calderas ecológicas.

Nota: Adaptado de Macías-González (2023), con base en datos del Consejo Regulador del Tequila, Centro de Investigaciones Mario Molina, Pemex, Secretaría de Energía y Biointra Renovables.

Metodología del estudio de caso

La investigación de Macías-González (2023) adoptó un enfoque cualitativo basado en un estudio de caso (Yin, 2018) centrado en Biointra Renovables y su relación con la industria tequilera en Jalisco. Se realizaron siete entrevistas semiestructuradas al gerente de ingeniería de Biointra Renovables, quien funge como enlace con el clúster de empresas tequileras de la región de Tequila, y siete visitas a tequileras que han adoptado o evalúan calderas de biomasa. Las entrevistas se diseñaron para obtener datos económicos (costos comparativos de combustóleo versus biomasa), sociales (empleos generados, perfiles requeridos) y ambientales (emisiones de CO₂, manejo de cenizas).

Los indicadores de impacto se calcularon con base en tres fuentes complementarias: (a) datos de campo proporcionados por Biointra Renovables sobre capacidad de planta, personal y costos operativos; (b) la Estrategia de sustentabilidad de la cadena productiva agave-tequila elaborada por el Centro de Investigaciones Mario Molina y el CRT (2016), que estableció la huella de carbono de la cadena agave-tequila con datos del año base 2014; y (c) datos de Petróleos Mexicanos sobre costos y factores de emisión del combustóleo. La reducción del 37% en emisiones de CO₂ corresponde a la proporción de la huella de carbono directa atribuible al uso de combustibles fósiles para la generación de vapor en la fase industrial del proceso tequilero, según el estudio del Centro Mario Molina y el CRT (2016). La reducción del 50% en costos energéticos se refiere específicamente al diferencial de costo de combustible entre combustóleo y pellets de biomasa, sin incluir costos de inversión inicial en nueva infraestructura.

Resultados: triple impacto en el caso analizado

Los hallazgos del trabajo de campo revelan un triple impacto derivado de la sustitución de combustóleo por pellets de biomasa de bagazo de agave en el caso estudiado. La Tabla 1 sintetiza los indicadores clave obtenidos, incluyendo parámetros técnicos del proceso.

Tabla 1. Indicadores de triple impacto y parámetros técnicos de la planta peletizadora de biomasa de bagazo de agave

Dimensión	Indicador	Valor reportado
Social	Empleos directos por planta peletizadora	39
	Puestos operativos (10 por línea × 3 líneas)	30
	Puestos administrativos	4
	Puestos de logística	5
	Empleos con formación universitaria	7
	Técnicos industriales	14
	Obreros	18
Ambiental	Reducción de emisiones de CO ₂ en la cadena productiva	37%
	Balance de GEI por combustión de biomasa	CO ₂ neutro
	Reincorporación potencial de cenizas al suelo	Sí *
Económico	Reducción de costos de combustible vs. combustóleo	50%
Capacidad	Capacidad instalada por planta (3 líneas)	12 t/h
	Capacidad por línea de producción	4 t/h
Técnico	Poder calorífico del pellet de bagazo de agave	17–19 MJ/kg
	Humedad del bagazo al llegar a planta	50%–70%
	Humedad requerida para peletizar	10%–15%

Nota. Datos obtenidos a partir de entrevistas a Biointra Renovables (2022) y visitas de campo a tequileras de la región, complementados con datos del Centro de Investigaciones Mario Molina y el Consejo Regulador del Tequila (2016) y de Petróleos Mexicanos. Adaptado de Macías-González (2023). * El uso agrícola de cenizas requiere caracterización y evaluación conforme a criterios agronómicos y ambientales.

En la dimensión social, cada planta peletizadora con capacidad de 12 toneladas por hora (tres líneas de 4 t/h cada una) genera 39 empleos directos que impulsan el desarrollo socioeconómico en la región (Evans *et al.*, 2017). En la dimensión ambiental, la sustitución de combustóleo por biomasa en la generación de vapor reduce las emisiones directas de CO₂ del proceso industrial, que representan el 37% de la huella de carbono total de la cadena agave-tequila según el Centro

Mario Molina y el CRT (2016). Es importante precisar que el balance de emisiones de la combustión de biomasa se considera CO₂-neutro, ya que el carbono liberado fue previamente capturado por la planta durante su crecimiento, lo que contrasta con las emisiones netas del combustóleo (Macías-González, 2023). Las cenizas resultantes de la combustión podrían reincorporarse al suelo como mejorador; no obstante, su uso agrícola requiere caracterización previa de composición, nutrientes, metales y alcalinidad conforme a criterios agronómicos y ambientales.

En la dimensión económica, los datos del caso indican una reducción de aproximadamente 50% en el costo de combustible respecto al combustóleo (véase Figura 2). Esta estimación se basa en la comparación del costo unitario por unidad de energía térmica entre ambas fuentes, considerando datos de precios de Petróleos Mexicanos y de Biointra Renovables. La sustitución podría fortalecer el posicionamiento de las empresas tequileras en mercados que valoran prácticas de sustentabilidad (Evans *et al.*, 2017), aunque la viabilidad del modelo depende de condiciones locales: disponibilidad constante de bagazo, humedad del residuo, logística de acopio, inversión en infraestructura, eficiencia de caldera y regulación ambiental.

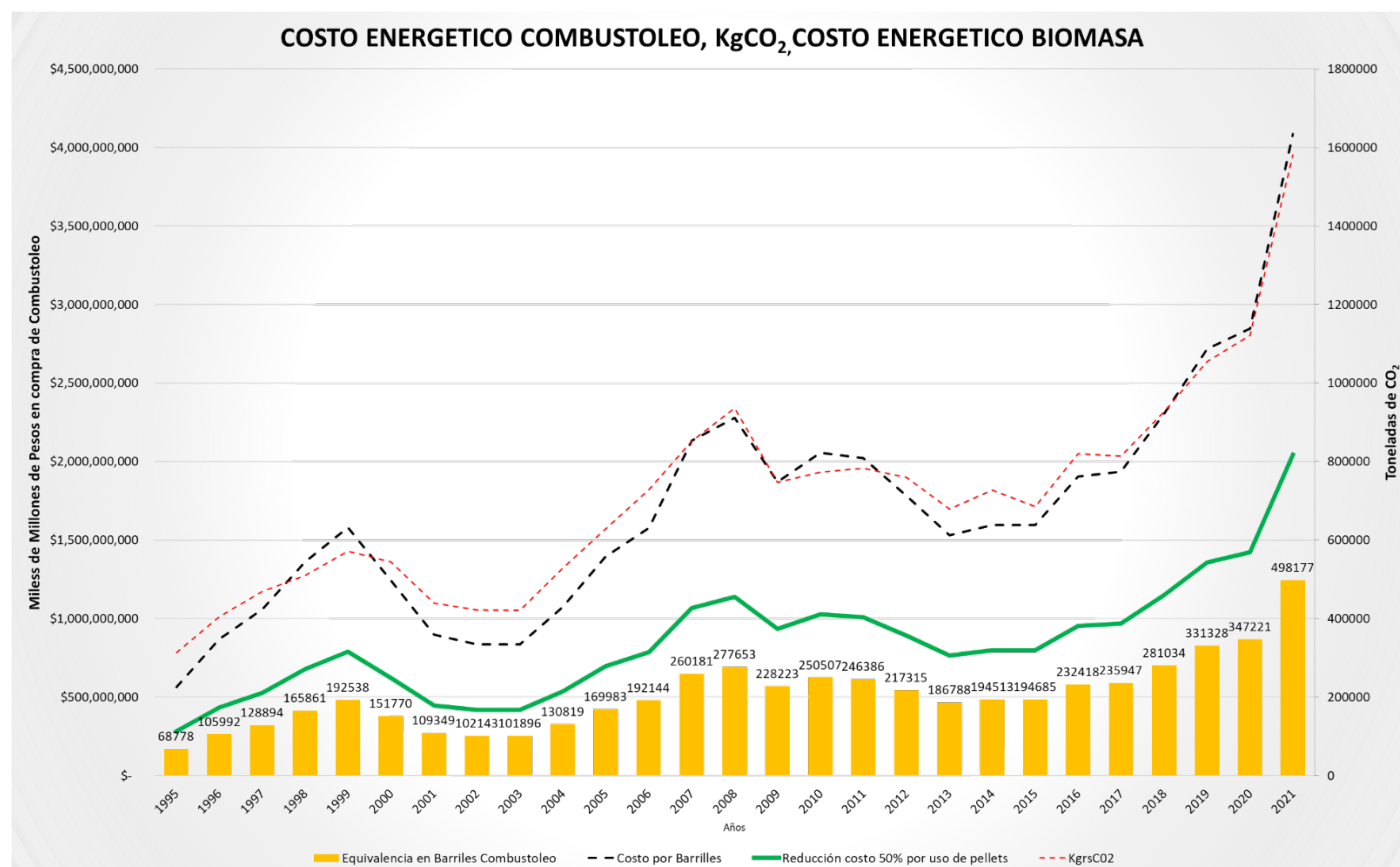


Figura 2. Comparativa de costos energéticos entre combustóleo y biomasa, equivalencia en barriles de combustóleo y emisiones de KgCO₂ (1995–2021).

Nota: Adaptado de Macías-González (2023), con datos del Consejo Regulador del Tequila, Centro de Investigaciones Mario Molina, Pemex y Secretaría de Energía.

Discusión: circularidad en la cadena agave-tequila

En términos de economía circular, el caso Biointra ilustra las tres estrategias que Bocken *et al.* (2016) identifican para modelos de negocio circulares. Cerrar ciclos significa reincorporar el bagazo como pellet al proceso productivo en lugar de desecharlo. Ralentizar ciclos implica extender el valor energético del residuo al sustituir combustibles fósiles por un recurso renovable. Estrechar ciclos se traduce en reducir el consumo de insumos intensivos en carbono. Esta articulación transforma el residuo en un insumo estratégico que modifica la lógica de creación de valor dentro de la cadena agave-tequila.

Sin embargo, la implementación de la economía circular enfrenta barreras estructurales (Kirchherr *et al.*, 2017) que en este caso se manifiestan en limitaciones tecnológicas para el procesamiento eficiente del bagazo (particularmente la necesidad de reducir su humedad del 50–70% al 10–15% antes de peletizar), dependencia de incentivos públicos y necesidad de inversión en infraestructura. La consolidación de este modelo depende de la articulación entre políticas públicas favorables, viabilidad económica sostenida y aceptación por parte del sector industrial. En Jalisco, la evaluación del potencial de biomasa realizada por el Colegio de Ingenieros Ambientales de México (2017) estimó que el bagazo de agave cuenta con un potencial energético de 11,348 TJ, frente a una demanda promedio del conglomerado industrial de 5,834 TJ, lo que confirma la suficiencia del recurso para alimentar las necesidades del sector.

Respecto al potencial de replicabilidad, el modelo podría adaptarse a otros sectores agroindustriales que generan residuos con capacidad calorífica, como las industrias del café, el azúcar y el arroz. No obstante, cada residuo presenta composición, humedad, logística y poder calorífico diferentes, por lo que la transferencia del modelo requiere estudios de factibilidad específicos para cada contexto.

Conclusiones

Este artículo de divulgación científica ha presentado el caso de Biointra Renovables para ilustrar cómo la valorización energética del bagazo de agave, mediante su conversión en pellets de biomasa, puede constituir una alternativa al uso de combustibles fósiles en la industria tequilera. Los datos del caso analizado muestran un triple impacto: en lo social, mediante la generación de 39 empleos directos por planta; en lo ambiental, con una reducción estimada del 37% en emisiones directas de CO₂ vinculadas a la generación de vapor; y en lo económico, con ahorros aproximados del 50% en costos de combustible.

Es necesario precisar que estos resultados corresponden a un estudio de caso específico y no deben generalizarse automáticamente a toda la industria tequilera, ya que la viabilidad del modelo depende de condiciones locales como la disponibilidad de bagazo, la inversión requerida, la logística de acopio y la tecnología de peletización disponible. El caso ilustra que la economía circular implica no solo un cambio técnico, sino también un proceso organizativo, económico e institucional que requiere coordinación entre el sector privado, el gobierno y la academia. Futuras investigaciones podrían enfocarse en la caracterización de las cenizas para uso agrícola, la optimización del proceso de secado del bagazo y la evaluación de la factibilidad del modelo en otros sectores agroindustriales.

Bibliografía

- Baskar, C., Ramakrishna, S., Baskar, S., Sharma, R., Chinnappan, A., & Sehrawat, R. (Eds.). (2022). *Handbook of solid waste management: Sustainability through circular economy*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-4230-2>
- Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308–320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- Centro de Investigaciones Mario Molina, & Consejo Regulador del Tequila. (2016). *Estrategia de sustentabilidad de la cadena productiva agave-tequila*. Centro Mario Molina. <https://centromariomolina.org/energia/estrategia-de-sustentabilidad-de-la-cadena-agave-tequila-2016-2/>
- Colegio de Ingenieros Ambientales de México. (2017). *Evaluación del potencial de la biomasa como parte de la matriz energética de México*. <https://www.researchgate.net/publication/314142701>
- Consejo Regulador del Tequila. (2019). *Manual del técnico tequilero*. Consejo Regulador del Tequila.
- Elkington, J. (1997). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. Capstone.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation.
- Evans, S., Vladimirova, D., Holgado, M., Van Fossen, K., Yang, M., Silva, E. A., & Barlow, C. Y. (2017). Business model innovation for sustainability: Towards a unified perspective for creation of sustainable business models. *Business Strategy and the Environment*, 26(5), 597–608. <https://doi.org/10.1002/bse.1939>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kumar, A., & Ram, C. (2021). Agave biomass: A potential resource for production of value-added products. *Environmental Sustainability*, 4, 245–259. <https://doi.org/10.1007/s42398-021-00172-y>
- Macías-González, C. (2023). *Modelo de economía circular aplicado a la industria tequilera: Valorización energética del bagazo de agave* [Trabajo de obtención de grado, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente]. REI-ITESO.
- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Nussbaumer, T. (2003). Combustion and co-combustion of biomass: Fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction. *Energy & Fuels*, 17(6), 1510–1521. <https://doi.org/10.1021/ef030031g>
- Stahel, W. R. (2010). *The performance economy* (2.^a ed.). Palgrave Macmillan.
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6.^a ed.). Sage.