



Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos
en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible.

Jansyn Paola Colmenares Rodríguez

Mellany Ortiz López

Sebastián Peñarete Vargas

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gerencia en Proyectos

Bogotá, Colombia

19/05/2026

**Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos
en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible**

Jansyn Paola Colmenares Rodríguez

Mellany Ortiz López

Sebastián Peñarete Vargas

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Gerencia de Proyectos

Director: Miguel Ángel Zúñiga Gutiérrez

Modalidad:

Misión académica internacional

Universidad EAN

Ingeniería

Maestría Gerencia de Proyectos

Bogotá, Colombia

19/05/2026

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos
en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

A nuestras familias, por su apoyo constante,
paciencia y confianza durante este proceso
académico, y por recordarnos que la disciplina
y la perseverancia son el fundamento de todo
logro significativo.

“La Tierra proporciona lo suficiente para
satisfacer las necesidades de cada hombre,
pero no la codicia de cada hombre.”
Mahatma Gandhi.

La ciencia sin conciencia no es más que la
ruina del alma.”
François Rabelais (1532)

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad EAN, Facultad de Ingeniería, por el acompañamiento académico y el rigor formativo brindado durante el desarrollo de la Maestría en Gerencia de Proyectos, que permitió consolidar las bases conceptuales y metodológicas de esta investigación.

A la profesora Paula Echeverry Pérez, por su orientación académica, retroalimentación y acompañamiento durante el proceso investigativo.

A la empresa BYD, por su disposición para participar en el proceso investigativo y por facilitar el acceso a información relevante para el análisis comparativo. De manera especial, agradecemos a los actores estratégicos entrevistados en China y Colombia, quienes compartieron su experiencia y visión sobre la gestión del ciclo de vida de las baterías y los desafíos de sostenibilidad en el sector de la movilidad eléctrica.

Reconocemos también el aporte de las instituciones y organismos multilaterales cuyas publicaciones técnicas y académicas sirvieron de base para el análisis comparativo desarrollado en este trabajo.

Finalmente, agradecemos a nuestras familias por su apoyo constante, comprensión y respaldo durante este proceso académico, que exigió dedicación, disciplina y compromiso permanente.

Resumen

La transición hacia la movilidad eléctrica se ha consolidado como una estrategia clave para reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar el cambio climático, donde las baterías de ion-litio representan el componente central. Sin embargo, su ciclo de vida plantea desafíos sociales, ambientales y regulatorios, especialmente en países en desarrollo. Este artículo presenta un estudio comparativo del ciclo de vida de estas baterías en Colombia y China, con énfasis en economía circular, sostenibilidad y gestión de residuos peligrosos.

Se desarrolló un estudio comparativo con enfoque mixto, bajo un diseño no experimental de tipo transversal, orientado al análisis descriptivo, correlacional e interpretativo de indicadores ambientales, regulatorios, tecnológicos y sociales. La investigación se sustentó en una revisión sistemática de literatura publicada entre 2006 y 2025, el análisis de informes de sostenibilidad y marcos normativos, la observación directa realizada durante una misión académica en China y la aplicación de entrevistas semiestructuradas y análisis de caso comparado con actores estratégicos de BYD en China y Colombia. Los resultados evidencian diferencias significativas en regulación, infraestructura de reciclaje, educación ambiental, trazabilidad y recuperación de materiales críticos, mostrando que mientras Colombia presenta limitaciones normativas, institucionales y baja capacidad instalada, China ha consolidado un sistema integral basado en responsabilidad extendida del productor y tecnologías avanzadas de reciclaje.

A partir de estos hallazgos, se proponen lineamientos estratégicos, técnicos y regulatorios orientados a fortalecer la gestión del ciclo de vida de baterías en Colombia, tomando como

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

referencias prácticas exitosas de China y adaptándolas al contexto nacional. El estudio aporta evidencia útil para la toma de decisiones en gestión empresarial, política pública y planificación de proyectos sostenibles asociados a la movilidad eléctrica.

Palabras clave: movilidad eléctrica; baterías de ion-litio; ciclo de vida; economía circular; reciclaje de baterías; sostenibilidad.

Abstract

The transition toward electric mobility has become a key strategy for reducing dependence on fossil fuels and mitigating climate change, with lithium-ion batteries serving as the central component of this transformation. However, their life cycle poses significant social, environmental, and regulatory challenges, particularly in developing countries. This article presents a comparative study of the life cycle of lithium-ion batteries in Colombia and China, with emphasis on the circular economy, sustainability, and hazardous waste management.

A comparative study with a mixed-methods approach was conducted under a non-experimental, cross-sectional design aimed at the descriptive, correlational, and interpretative analysis of environmental, regulatory, technological, and social indicators. The research was based on a systematic review of literature published between 2006 and 2025, the analysis of sustainability reports and regulatory frameworks, direct observation carried out during an academic mission in China, and the application of semi-structured interviews and comparative case analysis with strategic stakeholders from BYD in China and Colombia. The results reveal significant differences in regulation, recycling infrastructure, environmental education, traceability, and recovery of critical materials, showing that while Colombia faces regulatory and institutional limitations as well as low installed capacity, China has consolidated an

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

integrated system based on extended producer responsibility and advanced recycling technologies.

Based on these findings, strategic, technical, and regulatory guidelines are proposed to strengthen battery life cycle management in Colombia, drawing on successful practices from China and adapting them to the national context. The study provides useful evidence for decision-making in business management, public policy, and the planning of sustainable projects associated with electric mobility.

Keywords: electric mobility; lithium-ion batteries; life cycle; circular economy; battery recycling; sustainability.

Introducción

La movilidad eléctrica se ha consolidado como uno de los ejes centrales de la transición energética contemporánea, al ofrecer una alternativa tecnológica para reducir las emisiones asociadas al transporte y avanzar hacia modelos de desarrollo más sostenibles (Shang et al., 2025; Banco Interamericano de Desarrollo, 2023). En este proceso, las baterías de ion-litio cumplen un papel estratégico debido a su alta densidad energética, eficiencia y capacidad para soportar el crecimiento acelerado de los vehículos eléctricos durante las últimas dos décadas. Sin embargo, su contribución ambiental no puede evaluarse únicamente desde la fase de uso del vehículo, sino desde una perspectiva integral de ciclo de vida, que considere la extracción de materias primas, la fabricación, el transporte, la operación, la reutilización, el reciclaje y la disposición final (Harper et al., 2019; Gaines, 2023).

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

Diversos estudios han señalado que entre el 40 % y el 50 % de la huella de carbono de un vehículo eléctrico puede atribuirse a la fabricación de la batería, debido a la alta demanda energética de los procesos de extracción, refinación y transformación de materiales críticos como litio, cobalto y níquel (Shang et al., 2025; Scrucca et al., 2025). Además, cuando las baterías finalizan su vida útil en aplicaciones automotrices, pueden convertirse en residuos peligrosos si no son gestionadas adecuadamente, con riesgos potenciales de contaminación del suelo y de cuerpos de agua (Espinosa Escobar, 2020). No obstante, el fin de su vida útil vehicular no implica necesariamente su disposición final inmediata, dado que muchas baterías conservan capacidad remanente y pueden ser reutilizadas en aplicaciones de segunda vida, como sistemas de almacenamiento energético estacionario. Solo después de agotadas estas alternativas, su gestión debe orientarse hacia procesos especializados de reciclaje, tratamiento o disposición final bajo criterios técnicos y ambientales.

En el contexto internacional, China se ha posicionado como un actor dominante en la industria de baterías de ion-litio, tanto por su participación en la manufactura global como por el desarrollo de capacidades tecnológicas, regulatorias e industriales para la gestión posconsumo. Según Yang et al. (2025), más de la mitad de los vehículos eléctricos vendidos en el mundo durante 2023 fueron producidos por fabricantes chinos, mientras que más del 80 % de la capacidad global de reciclaje de baterías se concentraba en ese país. Este liderazgo evidencia la consolidación de un ecosistema industrial orientado no solo a la producción, sino también a la recuperación de materiales críticos, la trazabilidad y la responsabilidad extendida del productor. En esta misma línea, Zhang et al. (2025) sostienen que el reciclaje de baterías de ion-litio constituye un mecanismo estratégico para reducir la presión sobre recursos como litio, níquel y cobalto, fortaleciendo la sostenibilidad de la cadena de suministro frente al crecimiento de la electromovilidad.

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

En contraste, Colombia se encuentra en una etapa incipiente de adopción de movilidad eléctrica y de construcción institucional para la gestión integral de baterías de ion-litio. Aunque el mercado nacional de vehículos eléctricos muestra una tendencia de crecimiento, persisten brechas regulatorias, infraestructurales, tecnológicas y educativas que limitan la consolidación de un sistema sostenible para la recolección, reutilización, reciclaje y disposición final de estos componentes (Ramírez Arévalo, 2022; Banco Interamericano de Desarrollo, 2023). Esta situación plantea un desafío relevante para el país, dado que el incremento progresivo del parque automotor eléctrico exigirá capacidades técnicas, normativas y operativas que permitan prevenir impactos ambientales y, al mismo tiempo, aprovechar las oportunidades asociadas a la economía circular.

El problema central que aborda esta investigación radica en la ausencia de un sistema integral y suficientemente maduro para gestionar el ciclo de vida de las baterías de vehículos eléctricos en Colombia. Esta limitación genera riesgos ambientales, sociales y económicos, pero también representa una oportunidad estratégica para adaptar mejores prácticas internacionales, fortalecer esquemas de responsabilidad extendida del productor y promover modelos de economía circular aplicables al contexto nacional (Ellen MacArthur Foundation, 2015; Banco Interamericano de Desarrollo, 2024). En este sentido, el análisis comparativo con China permite identificar aprendizajes relevantes para orientar el desarrollo de capacidades regulatorias, tecnológicas y organizacionales en Colombia, sin desconocer las diferencias estructurales entre ambos países.

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

Como componente empírico complementario, esta investigación incorpora un estudio de caso comparado de BYD en China y Colombia, seleccionado por su relevancia estratégica en la industria global de vehículos eléctricos y baterías. Este caso permite contrastar prácticas corporativas, enfoques regulatorios, estrategias operativas y niveles de madurez institucional en dos contextos diferenciados. A partir de esta comparación, se busca comprender cómo una empresa líder del sector opera bajo condiciones regulatorias y de mercado distintas, así como identificar elementos que podrían ser transferidos, adaptados o reinterpretados para fortalecer la gestión sostenible de baterías de ion-litio en el contexto colombiano.

En consecuencia, el objetivo general de este estudio es analizar comparativamente el ciclo de vida de las baterías de ion-litio utilizadas en vehículos eléctricos en China y Colombia, con énfasis en sus implicaciones ambientales, regulatorias y de gestión sostenible. La investigación se orienta por la siguiente pregunta: ¿cuáles son las similitudes, diferencias e impactos ambientales y sociales de la gestión del ciclo de vida de las baterías de ion-litio para vehículos eléctricos en China y Colombia, y de qué manera las prácticas identificadas podrían adaptarse al contexto colombiano para fortalecer la sostenibilidad?

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

Para responder a esta pregunta, el estudio plantea cuatro objetivos específicos:

primero, examinar el impacto ambiental asociado al ciclo de vida de las baterías de vehículos eléctricos, considerando especialmente las fases de producción, segunda vida, reciclaje y disposición final; segundo, evaluar los sistemas de gestión del fin de vida de estas baterías en China y Colombia, a partir de variables regulatorias, disponibilidad de infraestructura y capacidad de recuperación de materiales; tercero, analizar el papel de los marcos normativos, la educación ambiental y la responsabilidad extendida del productor en las prácticas de recolección y reciclaje; y finalmente, formular directrices estratégicas, técnicas y regulatorias que contribuyan al fortalecimiento de la gestión sostenible del ciclo de vida de las baterías de ion-litio en Colombia.

Desde esta perspectiva, la investigación busca aportar una comprensión integral del fenómeno, articulando evidencia académica, información institucional y hallazgos derivados del caso comparado. Con ello, se espera contribuir a la discusión sobre sostenibilidad, economía circular y transición energética en países en desarrollo, particularmente en aquellos que, como Colombia, enfrentan el reto de anticipar los impactos futuros de la movilidad eléctrica y construir capacidades para una gestión ambientalmente responsable de sus tecnologías asociadas.

Marco teórico

Hablar de movilidad eléctrica implica necesariamente abordar el papel de las baterías, dado que estas han sido históricamente un componente esencial para el funcionamiento de los vehículos eléctricos y, en la actualidad, constituyen el núcleo tecnológico de su desarrollo y expansión. Más que un componente técnico, las baterías concentran una parte significativa de las oportunidades y desafíos asociados a la transición energética contemporánea, al incidir

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

directamente en la autonomía, el desempeño, los costos y la competitividad de esta tecnología. Asimismo, una proporción considerable de los impactos ambientales, los costos económicos, las tensiones geopolíticas por minerales estratégicos y diversos retos sociales vinculados a la cadena de suministro se relacionan con su ciclo de vida.

En este sentido, el marco teórico se estructura en torno a cuatro ejes conceptuales: el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), la economía circular, la sostenibilidad holística y el marco regulatorio. Estos enfoques permiten abordar de manera integral el estudio del ciclo de vida de las baterías de ion-litio, con énfasis en el análisis comparativo entre China y Colombia.

Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El debate público y político en torno a los vehículos eléctricos ha estado tradicionalmente influenciado por la premisa de que, al no emitir gases contaminantes durante su operación, estos constituyen una alternativa inherentemente sostenible. No obstante, la literatura académica reciente ha cuestionado esta interpretación. Shang et al. (2025) advierten que centrar el análisis exclusivamente en la fase de uso conduce a una comprensión parcial y potencialmente engañosa del impacto ambiental de esta tecnología.

En este contexto, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), estandarizado por la ISO 14040, adquiere relevancia como herramienta teórica y metodológica, al permitir evaluar los impactos ambientales de un producto desde la extracción de materias primas hasta su disposición final (Organización Internacional de Normalización, 2006).

Aplicado a las baterías de ion-litio, el ACV evidencia que una proporción significativa de la carga ambiental de los vehículos eléctricos se concentra en etapas previas a su operación. Shang et al. (2025) estiman que aproximadamente la mitad de las emisiones totales de un

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

vehículo eléctrico se generan durante su fase de fabricación, siendo la producción de la batería responsable de cerca de la mitad de dichas emisiones. Este hallazgo cuestiona la narrativa simplificada de la movilidad eléctrica como solución ambiental automática y resalta la necesidad de orientar las estrategias de mitigación hacia las fases iniciales del ciclo de vida.

Las diferencias tecnológicas entre tipos de baterías introducen complejidades adicionales. Scrucca et al. (2025) muestran que las baterías de fosfato de hierro y litio (LFP) presentan menores emisiones equivalentes de CO₂ por kilovatio-hora producido en comparación con las baterías de níquel, cobalto y manganeso (NCM), aunque estas últimas ofrecen mayor densidad energética. Estas diferencias evidencian que las decisiones tecnológicas implican compensaciones entre desempeño, impacto ambiental y costos económicos.

En América Latina, la aplicación de este enfoque aún presenta limitaciones. Vera Gallo (2020) señala el uso extendido de metodologías parciales, como el enfoque “del tanque a la rueda”, que omite etapas críticas del ciclo de vida. En el caso colombiano, esta limitación es especialmente relevante debido a la dependencia de la importación de baterías, lo que implica que una parte significativa de los impactos ambientales se genera fuera del territorio nacional, dificultando su incorporación en los análisis y en la formulación de políticas públicas.

Determinar dónde se generan los impactos constituye un primer paso esencial; sin embargo, este enfoque por sí solo resulta insuficiente para orientar estrategias de gestión sostenible.

Economía circular aplicada a baterías

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

En este contexto, la economía circular emerge como un enfoque complementario al ACV, orientado a la reducción de impactos a lo largo del ciclo de vida. Este paradigma propone la transición desde modelos lineales de producción, uso y disposición hacia sistemas en los que los materiales se mantienen en uso durante el mayor tiempo posible (Fundación Ellen MacArthur, 2015).

Aplicada a las baterías de ion-litio, esta perspectiva transforma la concepción de su fin de vida útil. Aunque eventualmente se convierten en residuos peligrosos, el final de su vida útil en aplicaciones automotrices no implica necesariamente su disposición final, ya que pueden conservar una capacidad remanente que permite su reutilización en aplicaciones de segunda vida, como sistemas de almacenamiento estacionario. Solo una vez agotadas estas alternativas, las baterías pasan a su gestión como residuo, requiriendo procesos adecuados de reciclaje.

Desde este enfoque, una batería fuera de uso deja de ser únicamente un residuo para convertirse en un recurso estratégico. Materiales como el litio, el cobalto y el níquel no solo implican altos costos ambientales de extracción, sino que también están asociados a dinámicas geopolíticas complejas (Gaines, 2018, 2023). Su recuperación mediante procesos de reciclaje contribuye a reducir la presión sobre los ecosistemas, disminuir la dependencia de importaciones y fortalecer la seguridad económica.

China constituye un caso paradigmático de implementación de este modelo. Zhang et al. (2025) destacan que sus sistemas de reciclaje han alcanzado altos niveles de eficiencia en la recuperación de materiales críticos, respaldados por procesos hidrometalúrgicos avanzados, capacidad industrial instalada e inversión tecnológica sostenida. Este desempeño responde a una articulación sistemática entre regulación estatal, incentivos económicos y coordinación

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

entre actores públicos y privados, lo que evidencia que la economía circular requiere marcos institucionales sólidos y planificación estratégica.

En contraste, Colombia enfrenta desafíos significativos. Ramírez Arévalo (2022) describe un escenario de fragmentación institucional, ausencia de infraestructura especializada y predominio de iniciativas aisladas. A nivel regional, el BID (2024) señala que la gestión del fin de vida de las baterías de ion-litio en América Latina aún se encuentra en etapas iniciales, con limitaciones regulatorias, técnicas y logísticas que dificultan la implementación de modelos circulares.

Sostenibilidad holística

El análisis del ciclo de vida de las baterías no puede limitarse a variables ambientales o tecnológicas. El concepto de sostenibilidad, consolidado en el Informe Brundtland (1987), plantea la necesidad de integrar dimensiones ambientales, sociales y económicas.

En este sentido, analizar únicamente las emisiones o las tasas de reciclaje resulta insuficiente. En el contexto de las baterías para vehículos eléctricos, es necesario incorporar factores sociales y culturales que inciden en su gestión. En Colombia, Espinosa Escobar (2020) evidencia un bajo nivel de conocimiento sobre la correcta disposición de baterías, lo que refleja brechas en educación ambiental. Este diagnóstico es complementado por Palacio Espinosa et al. (2020), quienes destacan que las políticas ambientales pueden perder efectividad si no se acompañan de procesos de sensibilización, capacitación y participación ciudadana.

Asimismo, la dimensión social del ciclo de vida incluye las etapas de extracción de minerales. Diversos estudios han documentado conflictos socioambientales asociados a la

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

minería de litio, cobalto y níquel (Harper et al., 2019; Gaines, 2023). Aunque estas actividades no se desarrollan directamente en Colombia, forman parte de la cadena global de suministro, por lo que deben ser consideradas en una evaluación integral de la sostenibilidad.

Marco regulatorio y gobernanza

Estos elementos remiten al papel del Estado y al marco regulatorio en la gestión del ciclo de vida de las baterías. Yang et al. (2025) destacan que en China la implementación de esquemas de responsabilidad extendida del productor ha sido determinante para estructurar un sistema eficiente de gestión, integrando mecanismos de trazabilidad, incentivos económicos y control estatal.

Este enfoque ha permitido cerrar el ciclo entre producción, uso y reciclaje, alineando los objetivos industriales y ambientales. En contraste, en América Latina, y particularmente en Colombia, el desarrollo regulatorio avanza a un ritmo más lento que el crecimiento del mercado.

Los informes del BID (2023, 2024) señalan que la ausencia de normativas específicas para baterías de vehículos eléctricos genera incertidumbre, desincentiva la inversión y dificulta la implementación de modelos de economía circular. De manera complementaria, el Monitor de Baterías 2024/2025 (Roland Berger & PEM RWTH Aachen University, 2024) resalta que la sostenibilidad y la circularidad se han consolidado como ejes estratégicos a lo largo de la cadena de valor global de las baterías, cuya adopción depende de marcos regulatorios claros y estables.

Síntesis de dimensiones analíticas

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

A partir del marco teórico desarrollado, se identifican cuatro dimensiones analíticas que orientan el análisis comparativo del ciclo de vida de las baterías de ion-litio entre China y Colombia. En primer lugar, el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida, abordado desde el Análisis de Ciclo de Vida y su articulación con la economía circular. En segundo lugar, la gobernanza regulatoria, entendida como el conjunto de políticas e instrumentos normativos que orientan la gestión de estas tecnologías. En tercer lugar, la capacidad tecnológica e infraestructura, asociada al desarrollo de sistemas de reciclaje y recuperación de materiales críticos. Finalmente, la dimensión social y educativa, que incorpora el conocimiento ambiental, las prácticas ciudadanas y los impactos sociales vinculados a la cadena global de suministro.

En conjunto, estas dimensiones integran los enfoques ambiental, económico y social de la sostenibilidad y constituyen la base conceptual para analizar de manera sistemática las brechas estructurales, regulatorias y operativas entre ambos países, así como para sustentar las recomendaciones de política pública y gestión propuestas en esta investigación.

Metodología

La investigación se desarrolló mediante un enfoque mixto convergente, orientado al análisis comparativo entre China y Colombia sobre la sostenibilidad del ciclo de vida de las baterías de ion-litio utilizadas en vehículos eléctricos. Este enfoque permitió integrar evidencia cuantitativa y cualitativa desde una perspectiva ambiental, regulatoria e institucional (Creswell & Plano Clark, 2018; Hernández Sampieri et al., 2018).

Desde el componente cuantitativo, se analizaron indicadores asociados a emisiones de CO₂, reciclaje, recuperación de materiales críticos y economía circular, utilizando información proveniente de literatura científica e informes institucionales (Anexo 1).

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

En el componente cualitativo se realizó una revisión sistemática de literatura mediante una búsqueda estructurada en la base de datos Scopus, utilizando ecuaciones definidas según los ejes temáticos del estudio: ciclo de vida, impacto ambiental, reciclaje, regulación y economía circular de baterías de ion-litio en vehículos eléctricos. Las búsquedas incluyeron combinaciones de palabras clave como “lithium-ion battery” AND “life cycle assessment” AND “electric vehicle”, “lithium-ion battery” AND recycling AND “end of life”, “lithium-ion battery” AND “carbon footprint” OR “environmental impact”, y “lithium-ion battery” AND regulation OR policy AND “circular economy”. Asimismo, se aplicaron filtros por periodo (2006–2025), idioma y tipo de documento. Como resultado, se seleccionaron 14 fuentes principales entre artículos indexados, informes técnicos y marcos normativos, organizados mediante una matriz de revisión documental (Anexo 2).

Adicionalmente, se incorporó un estudio de caso comparado entre BYD China y su operación en Colombia, complementado con entrevistas semiestructuradas realizadas entre 2024 y 2025 a representantes de ambas organizaciones (Anexos 3 y 4).

El diseño metodológico es no experimental y transversal, con alcance descriptivo-correlacional, orientado a identificar diferencias y brechas estructurales entre ambos países en dimensiones regulatorias, tecnológicas, ambientales y sociales. La selección de documentos y participantes se realizó mediante muestreo intencional por criterio, priorizando fuentes y actores con experiencia directa en sostenibilidad y gestión de baterías de ion-litio. Finalmente, se aplicó análisis temático y triangulación de fuentes para fortalecer la validez y consistencia de los hallazgos.

Población y muestra

La población del estudio estuvo conformada por actores públicos, privados, académicos y organizacionales vinculados con la movilidad eléctrica, la sostenibilidad y la gestión del ciclo

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

de vida de baterías de ion-litio en China y Colombia. Debido al enfoque mixto y no experimental de la investigación, se aplicó un muestreo intencional no probabilístico, orientado a seleccionar informantes clave con experiencia directa en regulación, sostenibilidad, reciclaje y economía circular asociados a la electromovilidad.

La muestra se estructuró en dos grupos comparativos: el primero integrado por actores vinculados al contexto chino, relacionados con producción, reciclaje y gestión del fin de vida útil de baterías; y el segundo conformado por representantes del contexto colombiano pertenecientes a sectores ambientales, empresariales y de sostenibilidad.

Como parte del componente empírico, se realizaron entrevistas y sesiones de intercambio con Ankey Chen, director ejecutivo de BYD China, y representantes del área comercial de la compañía, Leticia Fu y Kaylie Huang, abordando temas relacionados con reciclaje, economía circular y sostenibilidad organizacional. Posteriormente, en Colombia, se desarrolló una reunión técnica con Sebastián, Gerente de Proyectos de BYD Colombia, y María Alejandra, Coordinadora de Calidad y Medio Ambiente, con el propósito de analizar desafíos regulatorios, ambientales y operativos asociados a la gestión del ciclo de vida de baterías en el contexto colombiano.

La conformación de ambos grupos permitió desarrollar un análisis comparativo entre contextos con distintos niveles de madurez institucional y tecnológica, facilitando la identificación de brechas, buenas prácticas y oportunidades de mejora para la gestión sostenible de baterías de ion-litio en Colombia.

Instrumentos de recolección de información

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

Basado en el enfoque mixto de la investigación, se seleccionaron instrumentos de recolección orientados a integrar evidencia cuantitativa y cualitativa sobre la gestión del ciclo de vida de las baterías de ion-litio en China y Colombia. Los instrumentos fueron diseñados en coherencia con los objetivos del estudio y validados mediante revisión de pertinencia y claridad conceptual.

El componente cuantitativo se sustentó en el análisis de datos secundarios provenientes de informes institucionales, estadísticas oficiales y reportes de sostenibilidad, utilizados para construir indicadores relacionados con emisiones de CO₂, recuperación de materiales críticos, reciclaje y economía circular (Anexo 1). Estos indicadores permitieron comparar tendencias y desempeño ambiental entre ambos contextos nacionales.

El componente cualitativo se apoyó en la revisión documental y en entrevistas semiestructuradas con informantes clave. La revisión incluyó artículos científicos indexados, informes técnicos multilaterales y marcos regulatorios, organizados mediante una matriz de análisis documental (Anexo 2), facilitando la identificación de categorías temáticas, convergencias y brechas. Adicionalmente, se utilizaron entrevistas semiestructuradas realizadas a representantes de BYD China (Anexo 3) y BYD Colombia (Anexo 4), con el fin de profundizar en prácticas de sostenibilidad, limitaciones institucionales y oportunidades de economía circular asociadas a la gestión de baterías.

Ambos componentes fueron integrados mediante triangulación metodológica, contrastando los resultados cuantitativos con la evidencia cualitativa proveniente de documentos y entrevistas. Este proceso fortaleció la consistencia y validez de los hallazgos, permitiendo una comprensión más integral del fenómeno estudiado.

Resultados

Resultados de la revisión bibliográfica

La revisión documental permitió identificar y analizar fuentes académicas, informes institucionales y marcos normativos publicados entre 2006 y 2025, relacionados con el ciclo de vida de las baterías de ion-litio, sostenibilidad, economía circular, regulación ambiental y movilidad eléctrica. Los documentos sistematizados corresponden a contextos globales, China, Colombia y América Latina, y fueron organizados según dimensiones ambiental, regulatoria, social, estratégica y de circularidad.

Los hallazgos evidencian que China presenta avances consolidados en producción industrial de baterías, trazabilidad, reciclaje formal y regulación especializada, mientras que Colombia y América Latina se encuentran en una etapa emergente, caracterizada por capacidades técnicas limitadas e infraestructura aún insuficiente para gestionar el fin de vida útil de baterías de vehículos eléctricos.

Asimismo, la literatura coincide en que la sostenibilidad de la movilidad eléctrica depende no solo de la reducción de emisiones durante la operación del vehículo, sino también de la gestión integral del ciclo de vida de las baterías, incluyendo producción, logística, reutilización, reciclaje y disposición final.

Tabla 1. Síntesis de los principales hallazgos de la revisión bibliográfica según contexto geográfico y dimensión analizada

Instrumento: Matriz de revisión documental. (Anexo 2)

Propósito: Sistematizar y sintetizar información proveniente de literatura académica, informes institucionales y marcos normativos relacionados con el ciclo de vida de baterías de

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

ion-litio, economía circular, regulación y sostenibilidad, identificando los principales

hallazgos que sustentan el análisis comparativo entre China y Colombia.

Autor / Institución	Año	Contexto	Tema principal	Principal hallazgo	Dimensión analizada
Shang et al.	2025	China	ACV de vehículos eléctricos	La fase de producción de baterías concentra una parte relevante de la huella ambiental del vehículo eléctrico.	Ambiental
Scrucca et al.	2025	Global	ACV de baterías Li-ion	Las emisiones varían según química de batería y matriz energética utilizada en fabricación.	Ambiental
Harper et al.	2019	Global	Reciclaje de baterías EV	El reciclaje técnico requiere control ambiental e infraestructura especializada.	Circularidad
Zhao et al.	2021	China	Impacto ambiental asociado a la fabricación de baterías de ion-litio	Reportan valores promedio cercanos a 187.26 kg CO ₂ -eq/kWh para la producción de baterías de ion-litio	Ambiental
Gaines	2018	Global	Procesos de reciclaje	El reciclaje de baterías es clave para sostenibilidad y recuperación de materiales.	Circularidad
Gaines	2023	Global	Flujos de baterías al final de vida	La trazabilidad de materiales es fundamental para cerrar el ciclo productivo.	Circularidad / Regulatoria

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

Autor / Institución	Año	Contexto	Tema principal	Principal hallazgo	Dimensión analizada
Yang et al.	2025	China	Regulación y reciclaje	China fortaleció esquemas de responsabilidad extendida del productor y reciclaje formal.	Regulatoria
Zhang et al.	2025	China	Reciclaje de baterías	El reciclaje reduce presión sobre materiales críticos como litio, níquel y cobalto.	Circularidad
Banco Interamericano de Desarrollo (BID)	2024	América Latina y Caribe	Reciclaje y segunda vida	La región presenta rezagos en reciclaje, segunda vida e infraestructura especializada.	Regional
Banco Interamericano de Desarrollo (BID)	2023	América Latina y Caribe	Electromovilidad	La movilidad eléctrica requiere integración sostenible de cadena de suministro y regulación.	Estratégica
Obaya & Asinsten	2025	América Latina y Caribe	Litio y electromovilidad	América Latina tiene oportunidades estratégicas, pero necesita capacidades industriales y regulatorias.	Estratégica
Espinosa Escobar	2020	Colombia	Educación ambiental	Existe bajo conocimiento ciudadano sobre disposición adecuada de baterías.	Social
Ramírez Arévalo	2022	Colombia	Reaprovechamiento de baterías EV	Colombia presenta avances iniciales y baja capacidad de reaprovechamiento de baterías EV.	Colombia

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

Autor / Institución	Año	Contexto	Tema principal	Principal hallazgo	Dimensión analizada
Palacio Espinosa et al.	2020	Colombia	Estudio exploratorio	Se evidencian vacíos técnicos y necesidad de investigación local sobre ciclo de vida.	Colombia
Ellen MacArthur Foundation	2015	Global	Economía circular	Reutilizar, reciclar y extender vida útil reduce presión sobre recursos naturales.	Conceptual
Congreso de la República de Colombia	2013	Colombia	Ley 1672 RAEE	Colombia cuenta con marco general RAEE, pero no específico para baterías EV.	Regulatoria
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	2022	Colombia	Gestión RAEE	Fortalece posconsumo, aunque sin enfoque integral para baterías automotrices de litio.	Regulatoria
ISO 14040	2006	Global	Análisis de Ciclo de Vida	El ACV permite evaluar impactos desde extracción hasta disposición final.	Metodológica
Vera Gallo	2020	Colombia	Tank to Wheel Bogotá	Los análisis parciales pueden subestimar impactos reales del vehículo eléctrico.	Ambiental
Zhou	2024	Global	Huella de carbono baterías	La digitalización y eficiencia energética ayudan a reducir huella de carbono en baterías.	Ambiental

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

Autor / Institución	Año	Contexto	Tema principal	Principal hallazgo	Dimensión analizada
Roland Berger & PEM RWTH Aachen University	2024	Global	Battery Monitor	La circularidad y sostenibilidad son factores estratégicos en la cadena global de baterías.	Estratégica

Fuente: Elaboración propia a partir de literatura científica, informes multilaterales y marcos normativos revisados en el período 2006–2025.

Resultados asociados al objetivo específico 1: Impactos ambientales en la fase de producción de baterías.

Los resultados evidencian que la fase de producción de baterías de ion-litio constituye el principal punto crítico ambiental dentro del ciclo de vida de un vehículo eléctrico.

Investigaciones recientes estiman que entre el 45% y el 50% de la huella de carbono total del vehículo se concentra en esta etapa, principalmente debido al uso intensivo de energía y a los procesos de extracción, refinación y procesamiento de minerales estratégicos requeridos para su fabricación (Shang et al., 2025). Este comportamiento se asocia a la alta demanda energética de las fases iniciales de la cadena de suministro y de la manufactura industrial, las cuales concentran la mayor carga ambiental del ciclo de vida (véase Figura 1).

Figura 1. Fase de producción de baterías de ion-litio como punto crítico ambiental dentro del ciclo de vida.

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible



Fuente: Elaboración propia con base en ISO 14040:2006, Ellen MacArthur (2015), Gaines (2018, 2023) y Yang et al. (2025)

Los indicadores de emisiones por unidad de energía muestran variaciones significativas asociadas con la química de la batería y la matriz energética empleada en los procesos de fabricación. Scrucca et al. (2025) señalan que las emisiones asociadas a la fabricación de baterías de ion-litio presentan amplias variaciones dependiendo de la química de la batería, la matriz energética y los procesos industriales empleados. En revisiones sistemáticas recientes, Zhao et al. (2021) reportan valores promedio cercanos a 187.26 kg CO₂-eq/kWh para la producción de baterías de ion-litio.

La literatura también señala que, durante la última década, China ha registrado una reducción progresiva en las tasas de emisiones asociadas a la fabricación de baterías, vinculada a mejoras en eficiencia productiva y a una mayor incorporación de energías renovables en su matriz eléctrica. En contraste, para Colombia la huella ambiental asociada a esta fase se incrementa de manera indirecta por la dependencia de baterías importadas, las

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

emisiones derivadas del transporte internacional y la limitada capacidad de incidencia sobre los procesos productivos en origen (Banco Interamericano de Desarrollo, 2023).

En conjunto, estos resultados muestran que desde la fase de producción existen asimetrías estructurales que condicionan el desempeño ambiental de la movilidad eléctrica en ambos países.

Resultados asociados al objetivo específico 2: Gestión del fin de vida: recolección, reciclaje y recuperación de materiales críticos.

Los resultados muestran diferencias significativas entre China y Colombia en relación con la gestión del fin de vida útil de las baterías de ion-litio y la recuperación de materiales estratégicos.

En China, los sistemas de responsabilidad extendida del productor y los mecanismos de trazabilidad han permitido consolidar cadenas formales de reciclaje y recuperación de materiales críticos (Yang et al., 2025). La literatura reporta que los procesos hidrometalúrgicos alcanzan altos niveles de recuperación de litio, níquel y cobalto en instalaciones especializadas (Zhang et al., 2025). Sin embargo, también persisten segmentos informales de reciclaje asociados a menores controles ambientales y riesgos operativos (Harper et al., 2019).

Para el caso colombiano, los resultados evidencian un ecosistema aún incipiente para la gestión sostenible de baterías de vehículos eléctricos. Ramírez Arévalo (2022) identifica limitaciones relacionadas con la ausencia de infraestructura especializada, baja capacidad de reaprovechamiento y fragmentación institucional. Asimismo, el Banco Interamericano de Desarrollo (2024) advierte que esta situación genera impactos ambientales y pérdidas económicas derivadas de la no recuperación de materiales estratégicos.

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

La entrevista realizada a María Alejandra Ruge, Coordinadora de Calidad y Ambiente de BYD Colombia, permitió corroborar estas limitaciones. La entrevistada señaló que actualmente existen tres alternativas principales para la gestión de baterías fuera de uso en Colombia: (i) aprovechamiento nacional mediante aliados técnicos para procesos de evaluación y second-life, (ii) envío internacional a centros especializados y (iii) disposición final controlada como residuo peligroso (véase Anexo 4).

Adicionalmente, la entrevistada indicó que en Colombia todavía no existen capacidades suficientes para desarrollar procesos avanzados de reciclaje y aprovechamiento local de baterías de ion-litio, debido a limitaciones técnicas, regulatorias e industriales (véase Anexo 4).

En consecuencia, los resultados evidencian que la sostenibilidad de la movilidad eléctrica depende de la capacidad de cerrar efectivamente el ciclo de materiales mediante esquemas de economía circular, recuperación tecnológica y gestión integral del fin de vida útil (ver figura 2)

Figura 2. Comparación de recuperación de materiales críticos en baterías de ion-litio al final de su vida útil: capacidades reportadas en China y situación actual de Colombia



Fuente: Elaboración propia con base en Zhang et al. (2025) y Banco Interamericano de Desarrollo (2024).

Estos resultados evidencian que la sostenibilidad de la movilidad eléctrica está estrechamente asociada al cierre efectivo del ciclo de materiales, no solo desde la adopción del vehículo eléctrico como tecnología final, sino también desde la capacidad de gestionar integralmente su operación y permanencia a lo largo del tiempo.

Resultados asociados al objetivo específico 3: Marcos regulatorios, trazabilidad y gobernanza institucional.

El análisis comparativo evidencia diferencias significativas en el desarrollo regulatorio entre China y Colombia para la gestión de baterías de vehículos eléctricos. En China, existe una arquitectura normativa específica para baterías de tracción, compuesta por esquemas de responsabilidad extendida del productor, sistemas digitales de trazabilidad y mecanismos de seguimiento estatal (Yang et al., 2025). Estos instrumentos han permitido fortalecer la articulación entre producción, reciclaje y recuperación de materiales.

En contraste, Colombia cuenta principalmente con marcos regulatorios generales orientados a residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. La Ley 1672 de 2013 establece lineamientos para la gestión de RAEE, mientras que la Resolución 851 de 2022 fortalece la aplicación del principio de responsabilidad extendida del productor. No obstante, estas disposiciones no incorporan lineamientos técnicos específicos para baterías automotrices de ion-litio ni criterios especializados para procesos de reutilización, second-life o reciclaje industrial.

Los resultados obtenidos mediante entrevistas semiestructuradas evidencian que esta ausencia regulatoria dificulta la estandarización de procesos y limita el desarrollo de infraestructura especializada para reciclaje y aprovechamiento de baterías.

En consecuencia, la brecha regulatoria identificada limita la consolidación de capacidades técnicas, retrasa la implementación de esquemas de economía circular y reduce la coordinación entre actores públicos y privados en Colombia (Banco Interamericano de Desarrollo, 2023; Banco Interamericano de Desarrollo, 2024).

Resultados asociados al objetivo específico 4: Dimensión social y educación

ambiental.

Desde la dimensión social, los resultados evidencian diferencias relevantes entre China y Colombia en educación ambiental y cultura ciudadana asociadas a la gestión de baterías de ion-litio.

En Colombia, investigaciones orientadas al manejo de residuos tecnológicos identifican bajos niveles de conocimiento ciudadano frente a los riesgos ambientales derivados de la disposición inadecuada de baterías y residuos electrónicos. Espinosa Escobar (2020) evidenció prácticas de almacenamiento doméstico y eliminación junto con residuos convencionales, lo que limita la participación en sistemas formales de recolección y reciclaje.

En contraste, la literatura revisada para el caso chino describe estrategias integradas que combinan educación ambiental, incentivos económicos y herramientas digitales orientadas a fortalecer la participación ciudadana en sistemas formales de devolución y recuperación de baterías (Yang et al., 2025).

En conjunto, los resultados muestran que la sostenibilidad del sistema no depende únicamente de infraestructura y regulación, sino también de factores sociales, culturales y comportamentales que influyen directamente en la gestión adecuada de las baterías al final de su vida útil (ver figura 3).

Figura 3. Nivel de conocimiento ciudadano sobre la disposición de baterías de ion-litio en Colombia.

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible



Fuente: Elaboración propia con base en Espinosa Escobar (2020).

Análisis y discusión de resultados

Los hallazgos obtenidos evidencian que la sostenibilidad de la movilidad eléctrica depende de una gestión integral del ciclo de vida de las baterías de ion-litio y no únicamente de la reducción de emisiones durante la fase de uso del vehículo. En este sentido, el análisis comparativo permitió identificar diferencias estructurales entre China y Colombia en términos de regulación, trazabilidad, capacidad tecnológica e infraestructura para reciclaje y recuperación de materiales críticos.

Desde la dimensión ambiental, los resultados confirman que la fase de producción de baterías representa uno de los principales puntos críticos del ciclo de vida, debido al consumo intensivo de energía y a la extracción de minerales estratégicos. Estos hallazgos coinciden con Shang et al. (2025) y Scrucca et al. (2025), quienes señalan que una parte significativa de la huella de carbono del vehículo eléctrico se concentra en la fabricación de las baterías. Bajo este contexto, la sostenibilidad de la electromovilidad requiere transformar no solo el sistema de transporte, sino también las cadenas de suministro y producción asociadas.

En relación con el fin de vida útil, la experiencia china evidencia que la articulación entre responsabilidad extendida del productor, trazabilidad y reciclaje especializado favorece

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

mayores niveles de recuperación de materiales y fortalecimiento de la economía circular (Yang et al., 2025; Zhang et al., 2025). Esto coincide con Gaines (2023) y Harper et al. (2019), quienes destacan que el reciclaje avanzado constituye un factor estratégico para reducir riesgos ambientales y dependencia de minerales críticos.

Por el contrario, el caso colombiano refleja limitaciones regulatorias, técnicas e institucionales que restringen la consolidación de sistemas integrales de gestión. La ausencia de infraestructura especializada y de lineamientos específicos para baterías de vehículos eléctricos dificulta el cierre del ciclo productivo y limita el aprovechamiento de materiales estratégicos (Ramírez Arévalo, 2022; BID, 2024).

Desde la dimensión social e institucional, los resultados muestran que la sostenibilidad del sistema también depende de educación ambiental, coordinación interinstitucional y apropiación social. En Colombia persisten brechas de conocimiento frente a la disposición adecuada de baterías, mientras que en China se identifican estrategias más consolidadas de participación y trazabilidad ciudadana (Espinosa Escobar, 2020; Yang et al., 2025).

Finalmente, el estudio de caso comparado de BYD permitió corroborar que las diferencias entre ambos países no solo responden a capacidades tecnológicas, sino también al nivel de articulación entre actores públicos, privados y regulatorios. En este contexto, la experiencia china constituye un referente útil para orientar el fortalecimiento progresivo de modelos de gestión sostenible adaptados a las capacidades institucionales y económicas de Colombia.

Propuesta de lineamientos estratégicos para Colombia

Oportunidades identificadas

Los resultados evidencian oportunidades estratégicas para fortalecer la gestión del ciclo de vida de las baterías de ion-litio en Colombia. La adopción temprana de la

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

electromovilidad permite avanzar de manera anticipada en regulación, trazabilidad y capacidades técnicas, evitando futuros impactos ambientales y rezagos institucionales (Banco Interamericano de Desarrollo, 2023).

Asimismo, los principios de economía circular favorecen estrategias de reutilización, reciclaje y recuperación de materiales críticos, contribuyendo a reducir impactos ambientales y presión sobre recursos naturales (Ellen MacArthur Foundation, 2015; Gaines, 2018; Harper et al., 2019). De igual manera, los antecedentes académicos nacionales muestran una base técnica que puede fortalecer futuras decisiones estratégicas y regulatorias (Palacio Espinosa et al., 2020; Ramírez Arévalo, 2022).

Modelo referencial para Colombia

Con base en los hallazgos, se propone un modelo referencial orientado al fortalecimiento progresivo de la gestión sostenible de baterías de vehículos eléctricos en Colombia. El modelo plantea:

- Desarrollo de regulación específica para baterías de tracción y responsabilidad extendida del productor (Yang et al., 2025);
- Implementación de sistemas de trazabilidad y monitoreo (Gaines, 2023);
- Fortalecimiento de infraestructura y capacidades técnicas para second-life y reciclaje (Harper et al., 2019; Banco Interamericano de Desarrollo, 2024);
- Y promoción de economía circular, educación ambiental y articulación institucional (Ellen MacArthur Foundation, 2015; Espinosa Escobar, 2020).

El modelo no pretende constituirse en una política pública integral, sino en un marco de referencia para orientar proyectos piloto, ajustes regulatorios y procesos de toma de decisiones ajustados al contexto colombiano.

Conclusiones

La investigación evidenció que la sostenibilidad de la movilidad eléctrica depende de una gestión integral del ciclo de vida de las baterías de ion-litio, particularmente en las fases de producción, reciclaje y recuperación de materiales críticos.

El análisis comparativo mostró que China presenta mayores niveles de desarrollo en regulación, trazabilidad, infraestructura y reciclaje formal, mientras que Colombia aún enfrenta limitaciones regulatorias, técnicas e institucionales que dificultan la consolidación de modelos integrales de economía circular para baterías de vehículos eléctricos.

Asimismo, el estudio de caso permitió identificar diferencias operativas entre un mercado consolidado y uno emergente, evidenciando cómo la gobernanza, la capacidad industrial y los mecanismos de seguimiento inciden directamente en la sostenibilidad del sistema.

En conjunto, los hallazgos confirman que la transición hacia la electromovilidad sostenible requiere fortalecer esquemas progresivos de regulación, infraestructura especializada, recuperación de materiales y articulación institucional, ajustados a las capacidades y necesidades del contexto colombiano

Finalmente, se recomienda desarrollar futuras investigaciones orientadas a cuantificar el flujo nacional de baterías al final de su vida útil y evaluar instrumentos regulatorios piloto que permitan avanzar hacia un sistema colombiano de gestión sostenible basado en evidencia empírica.

Referencias bibliográficas

Banco Interamericano de Desarrollo. (2024). *Reciclaje y reúso de baterías de litio en América Latina y el Caribe: Revisión analítica de prácticas globales y regionales* (Nota técnica IDB-TN-02893). Departamento de Infraestructura y Energía, División de Energía. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/es/reciclaje-y-reuso-de-baterias-de-litio-en-america-latina-y-el-caribe-revisión-analítica-de-prácticas-globales-y-regionales>

Banco Interamericano de Desarrollo. (2023). *Hacia una integración sostenible: el potencial de la electromovilidad en América Latina y el Caribe* <https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/viewer/Hacia-una-integracion-sostenible-el-potencial-de-la-electromovilidad-en-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>

Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3rd ed.). SAGE Publications. [Designing and Conducting Mixed Methods Research | SAGE Publications Inc](https://www.sagepub.com/reference/designing-and-conducting-mixed-methods-research)

Congreso de la República de Colombia. (2013). *Ley 1672 de 2013 por la cual se establecen los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)*. Diario Oficial No. 48.855. https://www.cancilleria.gov.co/normograma/compilacion/docs/ley_1672_2013.htm

Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation. <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/4384c08da576329c/original/Towards-a-circular-economy-Business-rationale-for-an-accelerated-transition.pdf>

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

Espinosa Escobar, N. R. (2020). Las baterías como residuos tecnológicos contaminantes: Un reto de la educación ambiental. *Espiral, Revista de Docencia e Investigación*, 9(1), 71–
85. <https://revistas.ustabuca.edu.co/index.php/ESPIRAL/article/view/2442>

Gaines, L. (2018). Lithium-ion battery recycling processes: Research towards a sustainable course. *Sustainable Materials and Technologies*, 17, e00068.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993718300629>

Gaines, L. (2023). Tracking Flows of End-of-Life Battery Materials and Manufacturing Scrap. *Batteries*, Article 9070360. <https://www.mdpi.com/2313-0105/9/7/360>

Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L., & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75–86. <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1682-5>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2018). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Informe Brundtland. (1987). *Nuestro futuro común*. Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Naciones Unidas. [El informe Brundtland - Nuestro futuro en común | Cambio Climático .org](https://www.un.org/es/development/dpd/publications/brundtland)

International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. ISO

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Resolución 851 de 2022 por la cual se establecen los lineamientos para la gestión integral de los residuos de aparatos*

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

eléctricos y electrónicos (RAEE). Diario Oficial No. 52.170.

https://normograma.mintic.gov.co/mintic/compilacion/docs/resolucion_minambienteds_0851_2022.htm

Obaya, M., & Asinsten, J. (2025). *Oportunidades y desafíos para América Latina y el Caribe en el nuevo contexto global de la industria del litio y la transición hacia la electromovilidad*. En P. M. García & J. S. Blyde (Eds.). Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/viewer/Oportunidades-y-desafios-para-America-Latina-y-el-Caribe-en-el-nuevo-contexto-global-de-la-industria-del-litio-y-la-transicion-hacia-la-electromovilidad.pdf>

Palacio Espinosa, C. C., et al. (2020). *Estudio del ciclo de vida y disposición final de baterías de vehículos eléctricos – Fase exploratoria* [Trabajo de grado, Universidad EAFIT]. <https://repository.eafit.edu.co/items/f1901042-6f4d-4590-a268-a0b2eae8cebb>

Ramírez Arévalo, N. S. (2022). *Reaprovechamiento de las baterías recargables utilizadas en los vehículos eléctricos de la ciudad de Bogotá basado en un enfoque de análisis del ciclo de vida* [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/53036>

Roland Berger & PEM RWTH Aachen University. (2024). *Battery Monitor 2024/2025: The value chain between economy and ecology*. https://content.rolandberger.com/hubfs/07_presse/PEM_RWTH_RB_Batteriemonitor_2024_25_NEU_ccc.pdf

Shang, H., Sun, Y., Huang, D., & Meng, F. (2025). Life cycle assessment of atmospheric environmental impact on the large-scale promotion of electric vehicles in

China. Journal of Cleaner

Production. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266691612400001X>

Scrucca, F., Presciutti, A., et al. (2025). Life cycle assessment of Li-ion batteries for electric vehicles: A review focused on the production phase impact. Journal of Power

Sources. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775325005397?via=ihub>

Vera Gallo, N. G. (2020). *Análisis de ciclo de vida tank to wheel para vehículos eléctricos y de combustible fósil en transporte masivo para la ciudad de Bogotá,*

Colombia [Trabajo de grado, Universidad de los

Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/37a7d256-2891-45f6-bd22-d1f4f1512103>

Yang, J., Jiang, Q., Zhang, J. (2025). Bridging the regulatory gap: A policy review of extended producer responsibility for power battery recycling in China.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S097308262500047X>

Zhang, B., Xin, Q., Chen, S., Wang, B., Li, H., Wang, Z., Bansal, P. (2025). Lithium-ion battery recycling relieves the threat to material scarcity amid China's electric vehicle ambitions. <https://www.nature.com/articles/s41467-025-61481-y>

Zhang, Y., Li, Y., Lu, J., Liu, X., & Wang, H. (2025). Advanced hydrometallurgical recovery of critical metals from spent lithium-ion batteries: Efficiency, challenges and sustainability perspectives. Chemical Engineering Journal, 503, 159648.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586625044442>

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

Zhao, E., Walker, P. D., Surawski, N. C., & Bennett, N. S. (2021). Assessing the life cycle cumulative energy demand and greenhouse gas emissions of lithium-ion batteries.

Journal of Energy Storage, 42, 103090. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103090>

Zhou, Y. (2024). *Lifecycle battery carbon footprint analysis for battery sustainability with energy digitalization and artificial intelligence*. *Applied Energy*, 371, Article 123665.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123665>

Anexos

Anexo 1. Matriz de indicadores de sostenibilidad del ciclo de vida de baterías (China vs. Colombia).

Instrumento: Matriz de indicadores de sostenibilidad

Enfoque: Mixto (cuantitativo–cualitativo)

Alcance: Análisis del ciclo de vida (*cradle-to-gate*) y gestión de fin de vida

Dimensión	Indicador	Unidad	China	Colombia	Fuente
Ambiental	Intensidad de emisiones en la fase de producción de baterías	kg CO ₂ -eq/kWh	187,26	No aplica (sin producción industrial local)	Zhao et al. (2021)
Ambiental	Contribución de la producción de baterías al impacto total del vehículo eléctrico	Cualitativo	Fase dominante del impacto ambiental	Impacto indirecto vía importaciones	Shang et al. (2025); ISO 14040
Ambiental	Aplicación del enfoque de análisis de ciclo de vida (ACV)	Sí / No	Sí (ACV completo documentado)	Parcial / exploratorio	ISO 14040; Ramírez Arévalo (2022)
Circularidad	Existencia de reciclaje formal de baterías de tracción	Sí / No	Sí	Incipiente	Harper et al. (2019); BID (2024)
Circularidad	Recuperación de materiales críticos (Li, Ni, Co)	Cualitativo	Alta recuperación reportada	No cuantificada	Gaines (2023); Zhang et al. (2025)
Circularidad	Implementación de esquemas de segunda vida de baterías	Sí / No	Programas operativos	Proyectos piloto	BID (2024)

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

Dimensión	Indicador	Unidad	China	Colombia	Fuente
Regulatoria	Responsabilidad extendida del productor (EPR) para baterías EV	Sí / No	Sí, con marco específico	No específico para EV	Yang et al. (2025); Ley 1672 (2013)
Regulatoria	Marco normativo para RAEE	Sí / No	Sí (con énfasis en baterías EV)	Sí (enfoque general RAEE)	Yang et al. (2025); Resolución 851 (2022)
Social	Nivel de educación ambiental sobre residuos tecnológicos	Cualitativo	Programas estructurados	Bajo nivel de conocimiento ciudadano	Espinosa Escobar (2020)
Sistémica	Grado de gestión integral del ciclo de vida de baterías	Cualitativo	Enfoque sistémico producción–reciclaje	Gestión fragmentada del ciclo de vida	BID (2023); Obaya & Asinsten (2025)

Nota metodológica: En Colombia no se reportan valores de intensidad de emisiones en kg CO₂-eq/kWh para la producción de baterías de ion-litio destinadas a vehículos eléctricos, debido a la ausencia de producción industrial local. En consecuencia, el análisis ambiental para Colombia se aborda desde una perspectiva indirecta de cadena de suministro, conforme a los lineamientos de la norma ISO 14040.

Anexo 2. Matriz de revisión documental

Instrumento: Matriz de revisión documental

Propósito: Sistematizar información proveniente de literatura académica, informes institucionales y marcos normativos sobre ciclo de vida de baterías, economía circular, regulación y sostenibilidad.

Autor / Institución	Año	Tipo de fuente	Enfoque principal	Variables analizadas	Aporte al estudio	Uso en el artículo
---------------------	-----	----------------	-------------------	----------------------	-------------------	--------------------

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

Shang et al.	2025	Artículo científico	ACV de vehículos eléctricos en China	Impacto ambiental, producción de baterías	Evidencia del impacto ambiental en fase de producción	Marco teórico, Resultados
Scrucca & Presciutti	2025	Artículo científico	ACV de baterías Li-ion	Producción, intensidad de emisiones	Análisis del impacto ambiental de la producción	Resultados
Harper et al.	2019	Artículo científico (Nature)	Reciclaje de baterías EV	Tecnologías de reciclaje, recuperación	Base técnica para el fin de vida	Marco teórico
Gaines	2018	Artículo científico	Reciclaje de baterías	Procesos de reciclaje	Sustento técnico de economía circular	Marco teórico
Zhao et al.	2021	China	Impacto ambiental asociado a la fabricación de baterías de ion-litio	Reportan valores promedio cercanos a 187.26 kg CO ₂ -eq/kWh para la producción de baterías de ion-litio	Ambiental	Resultados, Propuesta
Gaines	2023	Artículo científico	Flujos de baterías al final de vida	Recuperación de materiales	Seguimiento de materiales críticos	Discusión
BID	2024	Informe técnico	América Latina y el Caribe	Reciclaje, segunda vida	Identificación de brechas regionales	Resultados, Propuesta
BID	2023	Informe institucional	Electromovilidad en ALC	Cadena de suministro, sostenibilidad	Contexto regional	Introducción
Espinosa Escobar	2020	Artículo académico	Educación ambiental	Cultura ciudadana	Dimensión social del problema	Resultados

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos
en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

Ramírez Arévalo	2022	Trabajo de grado	Colombia	ACV, reaprovechami ento	Diagnóstic o nacional	Resultado s
Palacio Espinosa et al.	2020	Trabajo de grado	Colombia	ACV exploratorio	Evidencia local preliminar	Marco teórico
Ellen MacArthur Foundatio n	2015	Informe conceptu al	Economía circular	Circularidad	Marco conceptual	Marco teórico
Congreso de la República	2013	Ley	RAEE	Regulación	Marco normativo colombian o	Marco teórico
MinAmbie nte	2022	Resoluci ón	RAEE	Lineamientos de gestión	Actualizac ión normativa	Marco teórico
ISO	2006	Norma técnica	ACV	Principios metodológicos	Base metodológ ica	Metodolo gía

Fuente: Elaboración propia a partir de literatura científica, informes multilaterales y marcos normativos (2006–2025).

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

Anexo 3. Entrevistas semiestructuradas – BYD China.

Tipo de fuente: Comunicación personal.

Medio: Entrevista presencial más correo electrónico.

Fecha: 9 de julio de 2025.

Informante: Kaylie Huang – BYD China.

Question 问题场	Reply 回答
1. What technologies and processes does BYD use to recycle and process end-of-life batteries? 1. 比亚迪有哪些技术和工艺来回收和处理废旧电池？	BYD evaluates the batteries, dismantles and reassembles those that have value for use into second-life batteries, which can be applied to energy storage in base stations, solar street lights and other fields. Batteries with no value for use will be handed over to a strategic partner, which will use wet recycling to recover valuable metal elements in the end-of-life batteries, such as lithium. 比亚迪会对电池进行评估，并将仍有价值的电池拆解并重新组装成二次利用电池，可用于基站储能、太阳能路灯等领域。无使用价值的报废电池将交给战略合作伙伴，其使用湿法回收废旧电池中的有价值金属元素，如锂。
2. What are the biggest challenges BYD faces in implementing a sustainable battery recycling process? 2. 比亚迪在实施可持续电池回收流程方面面临的最大挑战是什么？	The biggest challenge in the battery recycling process is that there are many channels for recycling used batteries, and it is difficult to obtain used batteries from the market. 电池回收流程中最大的挑战为废旧电池的渠道众多，从市场中获取废旧电池的难度大。
3. How does BYD ensure the traceability of recyclable materials in its supply chain? 3. 比亚迪如何确保其供应链中可回收材料的可追溯性？	Agreements with strategic partners to "return lithium from used batteries" guarantee the traceability of recycled lithium materials. 与战略合作伙伴达成协议，“废旧电池返锂”可保证再生锂材料的可追溯性。
4. What strategies does BYD use to minimize its carbon footprint in battery manufacturing? 4. 比亚迪采用哪些策略来最大限度地减少电池制造过程中的碳排放？	① Use Green Power/Green Electricity. Currently, some BYD battery factories use 100% green electricity, and other industrial parks are also continuously increasing the proportion of green electricity use according to the company's carbon neutrality plan. ② Carry out the selection and promotion of outstanding energy-saving technology transformation projects. Each factory sets energy intensity targets, and reduces factory energy consumption and increases energy utilization efficiency through technical transformation of major energy-consuming equipment such as air compressor stations, dehumidifiers, and waste heat recovery in boiler rooms. ③ By optimizing the logistics network and rationally planning loading, 100% of the transportation within the park uses electric forklifts to reduce carbon emissions during transportation. ④ Use green and low-carbon raw materials, including the use of recycled materials and reuse of packaging materials. ⑤ Improve electricity. BYD has phased out part of the factory's 100% electricity use. Other regions also gradually reduce the proportion of electricity use in the production process. ⑥ Carry out energy-saving and emission-reduction projects in the factory. Each factory has set energy intensity targets, reduced electricity, gas, and water consumption, and improved equipment efficiency to reduce factory energy consumption. ⑦ Through material reuse and recycling, the recycling rate of materials in the factory has reached 100% reuse of waste materials, and the recycling rate of materials has been improved. ⑧ Use recycled materials to reduce the use of raw materials. Packaging materials are reused.
5. What sustainability indicators do they use to assess the environmental impact of their operations? 5. 一般使用哪些可持续性指标来评估其运营对环境的影响？	Environmental, Social and Corporate Governance (ESG) Report, LCA, EPD statement, etc. 环境、社会与公司治理 (ESG) 报告、LCA、EPD声明等。
6. How is the consumption of resources such as lithium, cobalt, and nickel managed during battery production? 6. 电池生产过程中对锂、钴、镍等资源的消耗？	Managing the consumption of key resources such as lithium, cobalt and nickel in the battery production process is the core ring to achieve sustainable development. BYD systematically manages the consumption of resources such as lithium, cobalt and nickel through technological innovation (e.g., solid-state batteries), recycling economy (recycling and reuse), supply chain management (green procurement and localization), and data-based monitoring. 在电池生产过程中，锂、钴、镍等关键资源的消耗是可持续发展的核心环。比亚迪通过技术创新（如固态电池）、循环经济（回收与再利用）、供应链管理（绿色采购与本土化）和数据监控、系统性管理、区块链等资源的消耗。
7. What best practices implemented in China could be replicated in countries like Colombia? 7. 中国实施的哪些最佳实践可以在哥伦比亚等国家复制？	Some of BYD's measures on carbon emissions management can be learned from. 比亚迪在碳排放管理上的一些措施可以借鉴。
8. What circular economy measures stand out in BYD's strategy to extend battery life? 8. 比亚迪在延长电池寿命的策略中，哪些循环经济措施最突出？	BYD creates a full life cycle chain of batteries from "production use recycling". From the design stage, it has insisted on the lithium iron phosphate (LFP) battery, which has a longer cycle life than other lithium batteries. Used batteries will be used in the field of ladder to maximize the battery's service life. 比亚迪通过电池的“生产-使用-梯次利用-再生利用”的全生命周期管理，从设计阶段坚持磷酸铁锂电池，其循环寿命比其他锂电池更长。废旧电池将在梯次利用领域得到充分利用，最大限度地延长电池的使用寿命，提升废旧电池的利用率。梯次利用的电池将用于储能、低速电动车等领域，实现资源的循环利用。
9. What replacement plans or programs do they have for batteries that have reached the end of their useful life? 9. 对于已达到使用寿命的电池，有哪些更换计划或方案？	Targeted battery replacement programs based on customer demand for range. 根据客户对续航需求，针对性制定电池的替换方案。
11. Does BYD's sustainability strategy include implementing more sustainable mineral extraction processes for batteries? 11. 比亚迪的可持续发展战略是否包括实施更可持续的电池材料提取工艺？	BYD integrates sustainable development into the entire life cycle management from raw material extraction to product recycling, promotes the environmentally friendly transformation of the supply chain, ensures the sustainable development and use of mineral resources, mainly including environmentally friendly supply chain, technological innovation to reduce environmental impact, carbon footprint tracking and carbon neutrality, etc. 比亚迪将可持续发展融入从原材料提取到产品回收的全生命周期管理，推动供应链绿色转型，确保矿产资源的可持续开发与利用，主要包括绿色供应链、技术创新降低环境影响、碳足迹追踪与碳中和等。
12. What environmental regulations must BYD's post-consumer battery program comply with? 12. 比亚迪对售后电池回收项目必须符合哪些环保法规？	BYD's requirements for used batteries must comply with domestic and international battery-related environmental regulations: Chinese laws and regulations: 1) Law of the People's Republic of China on Prevention and Control of Environmental Pollution by Solid Wastes, 2) Interim Measures for the Administration of the Recycling of Power Batteries for New Energy Vehicles, 3) Regulations on the Management of Hazardous Wastes, etc. International regulations: the new EU Battery Law of EU 2023/1542, etc. BYD meets the requirements of environmental regulations through full life cycle management (from production to recycling), compliance cooperation (joint treatment with qualified enterprises), technological innovation (to reduce the risk of pollution) and international compliance certification. 比亚迪通过全生命周期的管理（从生产到回收）、合规合作（与合格企业联合处理）、技术创新（降低污染风险）和国际合规认证来满足环保法规要求。
13. As the parent company of BYD Colombia, what guidelines does BYD China have for the use and recycling of battery materials in Colombia? 13. 作为比亚迪哥伦比亚的母公司，比亚迪中国对哥伦比亚电池材料的使用和回收有哪些指导方针？	Battery materials use lithium iron phosphate (LFP) batteries with better cycling performance. Battery recycling needs to build a battery life cycle management system, using digital methods to track and record the flow of batteries, and improve recycling efficiency; practice the principle of environmentally design, and adopt designs for recycling in the research and development stage of batteries, such as improving the disassembly of batteries, and optimizing the structural design. 电池材料使用磷酸铁锂(LFP)电池，具有更好的循环性能。电池回收需要建立电池生命周期管理体系，采用数字化手段跟踪和记录电池的流向，提高回收效率；践行环保设计理念，并在电池研发阶段采用便于回收的设计，如优化电池的拆解结构，提升电池的拆解效率，优化电池的结构设计，提升电池的拆解效率。

Nota. Información obtenida mediante comunicación por correo electrónico con Kaylie Huang (9 de julio de 2025).

Anexo 4. Entrevista semiestructurada – BYD Colombia.

Tipo de fuente: Entrevista presencial.

Fecha: 05 de agosto de 2025.

Informante: María Alejandra Ruge – Coordinadora de Calidad y Ambiente, BYD Colombia.

La información presentada en este apartado se obtuvo a partir de una entrevista semiestructurada realizada a BYD con Alejandra Ruge, Coordinadora de Calidad y Ambiente de BYD Colombia, llevada a cabo en noviembre de 2025. Este intercambio se desarrolló con fines estrictamente académicos para la elaboración del presente artículo científico y se referencia como comunicación personal (A. Ruge, comunicación personal, noviembre de 2025). Para la recolección de la información se diseñó un instrumento orientado a explorar aspectos relacionados con sostenibilidad, trazabilidad, economía circular y gestión ambiental en los procesos asociados al ciclo de vida de las baterías.

Las preguntas orientadoras fueron las siguientes junto con su respuesta:

1. ¿Cómo afecta la brecha de avance tecnológico en baterías a la generación de residuos en Colombia, considerando que el país recibe versiones anteriores de baterías con menor eficiencia y vida útil?

Respuesta: La Coordinadora de Calidad y Ambiente de BYD Colombia explicó que actualmente la compañía trabaja con tecnología Blade, basada en baterías con química LFP (Lithium, Iron and Phosphate), compuestas principalmente por litio, hierro y fosfato. Señaló que anteriormente la empresa utilizaba baterías con tecnología NCM, compuestas por níquel, cobalto y manganeso.

Asimismo, indicó que la principal diferencia entre ambas tecnologías radica en la duración de la vida útil, la eficiencia, la calidad y los costos de producción. En este sentido, destacó que la tecnología LFP ofrece una mayor durabilidad, mejores niveles de seguridad y

un menor impacto ambiental en comparación con las baterías NCM, las cuales generan una mayor cantidad de residuos peligrosos, presentan menor aprovechamiento de sus componentes y menor eficiencia energética.

2. ¿Existen diferencias en el porcentaje de aprovechamiento de los componentes entre la batería Blade y la batería NCM?

Respuesta: La entrevistada manifestó no tener presente el porcentaje exacto de aprovechamiento de los componentes de cada tipo de batería. Sin embargo, señaló que la batería Blade ofrece una vida útil estimada entre 10 y 15 años en los vehículos, mientras que la batería NCM presenta una duración aproximada de entre 8 y 10 años.

3. ¿Qué condiciones debe cumplir Colombia para desarrollar capacidades tecnológicas e industriales que permitan el reciclaje local de baterías eléctricas?

Respuesta: La entrevistada expresó que Colombia aún enfrenta importantes retos en materia tecnológica, científica y de infraestructura para lograr desarrollar procesos locales de reciclaje de baterías eléctricas. Según comentó, la casa matriz de la compañía en China cuenta con un desarrollo tecnológico mucho más avanzado y con el conocimiento técnico necesario para el tratamiento y aprovechamiento de estos componentes, situación que todavía no se evidencia en el contexto colombiano. Por ello, considera fundamental fortalecer los procesos de capacitación y formación especializada en el país.

Asimismo, señaló que algunos países de Latinoamérica, como Costa Rica y Panamá, ya vienen adelantando iniciativas relacionadas con el reciclaje y aprovechamiento de baterías. En Colombia, aunque todavía no existen grandes avances tecnológicos en esta materia, la

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

empresa trabaja de la mano con aliados estratégicos que permiten dar aprovechamiento a ciertos componentes de las baterías.

En este proceso, explicó que algunos módulos que aún conservan capacidad de funcionamiento son extraídos para reutilizarlos en sistemas de almacenamiento de energía, paneles solares o incluso en nuevas baterías, permitiendo extender la vida útil de las celdas que todavía pueden ser aprovechadas. Por otro lado, cuando los componentes ya no pueden reutilizarse, los metales son exportados a otros países mediante un convenio de economía circular desarrollado con AsiaLease, organización que trabaja con proveedores especializados en el manejo y tratamiento de este tipo de materiales, encargados de evaluar las mejores opciones y ofertas internacionales para la comercialización, compra y aprovechamiento de estos componentes.

4. ¿Qué limitaciones existen en el marco regulatorio colombiano para establecer un sistema integral de recolección, reutilización y reciclaje de baterías de litio?

La entrevistada señaló que una de las principales limitaciones en Colombia es la ausencia de una normativa específica que regule de manera integral el manejo, recolección, reutilización y reciclaje de las baterías de ion-litio. Indicó que actualmente las disposiciones existentes se enfocan principalmente en las baterías de plomo-ácido, asociadas a baterías de bajo voltaje, por lo que aún no existe una regulación especializada para las baterías utilizadas en vehículos eléctricos.

Igualmente, mencionó la Resolución 0851 de 2022, relacionada con los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), la cual contempla programas posconsumo aplicables a importadores de determinados códigos arancelarios. Sin embargo, considera que

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

esta regulación todavía resulta insuficiente para establecer un sistema integral que permita controlar y estandarizar todo el ciclo de vida de las baterías de litio en el país.

Además, la entrevistada comentó que actualmente no existen iniciativas claras por parte del gobierno orientadas a promover alianzas público-privadas para el desarrollo de sistemas de recolección, reutilización y reciclaje de baterías de ion-litio, situación que, en su opinión, contribuye a la existencia de un vacío normativo y limita el avance de este tipo de proyectos en el país.

5. ¿Cómo puede el Estado colombiano incentivar la economía circular en el sector de movilidad eléctrica a través de políticas públicas y fiscales?

La entrevistada indicó que en Colombia no existen incentivos tributarios específicos para promover empresas dedicadas al reciclaje de baterías de vehículos eléctricos, lo que hace que este sector aún no resulte atractivo para muchos empresarios. En su opinión, la implementación de beneficios fiscales y políticas públicas orientadas a la economía circular podría impulsar significativamente esta industria, especialmente ante el creciente aumento de la demanda de vehículos eléctricos en el país.

6. ¿Qué tecnologías y procesos utiliza BYD para reciclar y desechar baterías al final de su vida útil?

Respuesta: La entrevistada explicó que en BYD Colombia se realiza un análisis del estado de salud de las baterías a nivel de celdas, con el fin de determinar cuáles componentes aún pueden ser aprovechados. A partir de este diagnóstico, las baterías son desensambladas y las celdas que continúan funcionando son reacondicionadas y ensambladas nuevamente para

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

darles una segunda vida útil, mientras que aquellas que ya no pueden aprovecharse son gestionadas mediante la disposición de sus metales o tratadas como residuos peligrosos.

Asimismo, señaló que este proceso en Colombia se desarrolla a través de proveedores especializados y de manera tercerizada. Entre las alternativas de gestión identificadas se encuentran el aprovechamiento nacional, el aprovechamiento internacional y, finalmente, la disposición final como residuo peligroso cuando los componentes ya no pueden ser reutilizados.

Sincronización del Proyecto / Resumen del Estado

Contexto y objetivo de la reunión

- Reunión entre el equipo académico de la Maestría en Gerencia de Proyectos y BYD Colombia (María Alejandra Ruge, Coordinadora de Calidad y Ambiente) para recopilar información para un artículo científico.
- Enfoque práctico: entender el estado actual de BYD Colombia, procesos disponibles localmente y opciones de colaboración académica.

BYD Colombia: Estado Actual

- Tecnologías de baterías:
- Actual: litio–hierro–fosfato (LFP), con mayor vida útil y eficiencia, menor generación de residuos peligrosos.
- Anterior: NCM (níquel–cobalto–manganeso), menor durabilidad y eficiencia.
- Batería Blade: nueva generación en BYD con mayor eficiencia; vida útil exacta por confirmar.
- Operación y trazabilidad:

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

- BYD Colombia inició la recepción de baterías para gestión el año pasado.
- Se han realizado tres entregas a un proveedor aliado; están pendientes informes con estado de salud (SoH) y porcentajes de aprovechamiento y disposición.
- La trazabilidad se gestiona con certificados de disposición final y reportes del proveedor por entrega.
- Capacidades locales:
- BYD Colombia puede realizar análisis de baterías a nivel de celdas/módulos y coordina con aliado local para segundo uso.
- Equipo de Medio Ambiente en Colombia es reducido (4 personas), lo que limita la capacidad de ejecución interna.

Procesos y Capacidades de Reciclaje

- Flujo en China (referencia de casa matriz):
- Diagnóstico por celdas, desensamblaje, reaprovechamiento de celdas funcionales y disposición o recuperación de metales de las no funcionales.
- Opciones operativas en Colombia:
- Reutilización de módulos/celdas en sistemas de almacenamiento de energía (p. ej., apoyo a renovables).
- Exportación de metales recuperados conforme al Convenio de Basilea cuando procede.
- Tres alternativas de procedimiento en BYD Colombia:
- Aprovechamiento nacional mediante proveedor aliado (análisis, second-life).
- Aprovechamiento internacional (Costa Rica, Panamá o BYD Auto en China) enviando la batería completa.

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

- Disposición final como residuo peligroso a nivel nacional o internacional (se busca evitarla por impacto socioambiental).

Marco Regulatorio y Alianzas

- Marco normativo en Colombia:
- No existe norma específica para la gestión de baterías de ion litio.
- Sí existen normas para baterías de plomo-ácido (bajo voltaje).
- Resolución 851 de 2022 (RAEE): establece programas de posconsumo para importadores según códigos arancelarios y umbrales; no cubre integralmente baterías de ion litio automotrices.
- Articulación institucional:
- No se conocen mesas de trabajo activas del Gobierno sobre regulación de baterías de ion litio.
- No hay articulación vigente BYD-ministerios para este tema; el sector reconoce el vacío legal.
- La ANDI podría facilitar acercamientos con autoridades ambientales para avanzar en lineamientos.

Retos Clave

- Tecnológicos y de conocimiento:
- Ausencia de tecnología y capacidades técnicas locales para reciclaje integral de baterías de ion litio.
- Logísticos:
- Necesidad de una red de recolección, puntos de acopio, protocolos de almacenamiento y capacidades de desensamblaje.

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

- Creciente volumen proyectado por el auge de ventas de vehículos eléctricos.
- Información y gestión:
- Informes pendientes del proveedor para cuantificar aprovechamiento real.
- Acceso limitado a datos de China; costos de fabricación confidenciales.
- Capacidad interna:
- Equipo reducido para desplegar múltiples iniciativas ambientales y de sostenibilidad.

Oportunidades y Recomendaciones

- Política pública y mercado:
- Incentivos fiscales y bonos verdes para fomentar inversión en plantas y procesos de reciclaje de baterías.
- Cofinanciación estatal para infraestructura logística y tecnológica de economía circular.
- Nicho de negocio para gestores de residuos peligrosos ante el inminente incremento de baterías al final de vida.
- Colaboración academia–empresa:
- I+D aplicada en técnicas de reaprovechamiento y reciclaje adaptadas al contexto colombiano.
- Diseño de red logística (recolección, acopio, transporte seguro, desensamblaje) y evaluación de viabilidad económica.
- Medición de huella de carbono de BYD Colombia (priorizando alcance 2 inicialmente) y diseño de un esquema de informe anual de sostenibilidad alineado con estándares.
- Estandarización y trazabilidad:

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

- Fortalecer procedimientos de diagnóstico por celdas/módulos y métricas de rendimiento de second-life.
- Consolidar indicadores locales: uso eficiente de agua y energía, residuos, contingencias ambientales, gestión de químicos.

Lagunas de información y datos pendientes

- Vida útil estimada de la batería Blade (dato por proyectos).
- Porcentajes de reciclabilidad/aprovechamientos comparados (NCM vs LFP vs Blade) bajo condiciones locales.
- Informes del proveedor aliados sobre las tres entregas (SoH, % de second-life, % de metales recuperados, % dispuesto).
- Detalle de destinos internacionales para metales recuperados (depende de la mejor oferta del mercado).
- Situación real de capacidades en Brasil u otros países de la región.
- Informe de sostenibilidad global de BYD y posibilidad de desagregar indicadores para Colombia.
- Proyección de volumen de baterías al final de vida en Colombia según crecimiento del parque eléctrico.

Riesgos

- Socioambientales:
- Contaminación por metales pesados si se incrementa la disposición final sin aprovechamiento.
- Regulatorios:

Análisis comparativo del ciclo de vida de baterías de ion-litio de los vehículos eléctricos en China y Colombia: implicaciones regulatorias y de gestión sostenible

- Persistencia del vacío legal para ion litio que frena inversión y estandarización de procesos.
- Operacionales:
- Cuellos de botella logísticos ante el rápido crecimiento de vehículos eléctricos y limitada capacidad local.

Nota. Información recopilada mediante reunión académica presencial y validada por comunicación por correo electrónico con María Alejandra Ruge, Coordinadora de Calidad y Ambiente de BYD Colombia.