

Análisis del ciclo de vida en pavimentos: actualidad y perspectiva

Analysis of the life cycle in pavements: current situation and perspective

Zapata Ferrero, Ignacio; Rivera, Julián; Botasso, Gerardo

Ignacio Zapata Ferrero

izapata@frlp.utn.edu.ar

LEMaC Centro de Investigaciones Viales. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional La Plata – CIC PBA, Argentina

Julián Rivera

jrivera@frlp.utn.edu.ar

LEMaC Centro de Investigaciones Viales. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional La Plata – CIC PBA, Argentina

Gerardo Botasso

gbotasso@frlp.utn.edu.ar

LEMaC Centro de Investigaciones Viales. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional La Plata – CIC PBA, Argentina

Ingenio Tecnológico

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

ISSN-e: 2618-4931

Periodicidad: Frecuencia continua

vol. 3, e016, 2021

ingenio@frlp.utn.edu.ar

Recepción: 16 Junio 2021

Aprobación: 24 Junio 2021

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/266/2662024009/index.html>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

Resumen: El aumento de la temperatura global, como un indicador de la constante contaminación que existe a nivel mundial, resulta un problema aun sin solución. Como medidas para mitigar este problema se proponen varias soluciones en pos de reducir el impacto que se tiene en el planeta.

El sector de los pavimentos no es ajeno a este problema, el cual genera costos ambientales importantes, ya sea en una construcción nueva o en cada intervención de mantenimiento realizada. En los últimos años, la aplicación del análisis del ciclo de vida para evaluar costos ambientales en producción de materias primas y emisiones se ha vuelto de gran importancia.

En el siguiente trabajo se realiza un análisis de la bibliografía existente del tema, para establecer los indicadores utilizados, así como su vocabulario específico, las emisiones y los consumos contabilizados y las normas de aplicación. Además de revisar los estudios de los autores más emblemáticos dentro del área de aplicación con los pavimentos flexibles, se puede ver la ausencia de una norma propia del área de los materiales viales, que permita poner en un mismo plano todos los análisis contabilizados.

Palabras clave: Pavimentos, Análisis de ciclo de vida, Asfalto, Residuos.

Abstract: The increase in global temperature, as an indicator of the constant pollution that exists worldwide, is a problem that still has no solution. As measures to mitigate this problem, various solutions are proposed in order to reduce the impact on the planet.

The flooring sector is no stranger to this problem, which generates significant environmental costs, either in a new construction or in each maintenance intervention carried out. In recent years, the application of life cycle analysis to assess environmental costs in raw material production and emissions has become of great importance.

In the following work an analysis of the existing bibliography of the subject is carried out, to establish the indicators used, as well as their specific vocabulary, the emissions and consumptions recorded and the applicable standards. In addition to reviewing the studies of the most emblematic authors within the area of application with flexible pavements, it is possible to see the absence of a standard specific to the area of road materials, which allows all the counted analyzes to be put on the same plane.

Keywords: Pavements, Life cycle analysis, Asphalt, Waste.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente crítica de la opinión pública a los procesos industriales, altamente contaminantes, lleva a varios investigadores a poder analizar, de alguna forma, los costos ambientales producidos por esos procesos. En base a esto se empieza a configurar el análisis de ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés para *Life Cycle Assessment*), para tener en cuenta cómo impacta en el planeta cada uno de los procesos que se lleva a cabo en un proceso industrial. De esta forma se hace un análisis de los recursos naturales utilizados, de la energía consumida y de las emisiones generadas en cada subproceso asociado.

Actualmente, es fundamental tener en cuenta el ciclo de vida de los materiales a la hora de realizar un proyecto para la construcción de un pavimento. Esto abarca desde la primera extracción de materiales, hasta el cumplimiento de la vida útil de la carretera. El incremento del 10 % al 14 % en las emisiones del sector del transporte de 2000 a 2010, del cual el 72 % de dichas emisiones corresponde al sector referido a la construcción y mantenimiento de las carreteras, implica realizar un detallado análisis sobre esta cuestión (Lu et al., 2019).

Santos et al. (2018), Heidari et al. (2020), Lu et al. (2019) ya han hecho análisis de este tipo, para tener en cuenta las distintas variables en juego que entran a la hora de llevar a cabo el proyecto de un camino. Más aun, con la inclusión de materiales reciclados, como puede ser el RAP (de sus siglas en inglés para *Recycled Asphalt Pavement*), el polvo de caucho (comúnmente denominado NFU por su procedencia de los Neumáticos Fuera de Uso) y plásticos (como última tendencia y con resultados promisorios en el último tiempo).

2. FUNDAMENTOS

Cada una de las evaluaciones que se quieran realizar en Gestión ambiental siguen los lineamientos, por lo general, de la norma ISO 14040/2006 de Análisis de Ciclo de Vida y de la norma ISO 14044/2006; en las cuales se detalla en forma ampliada desde el objetivo que se quiere alcanzar hasta el inventario a realizar para su correcta aplicación. Como pilar fundamental, la norma deja explícito que la evaluación debe ser detallada en cada uno de sus aspectos, con la intención de que cada proceso considerado sea interpretado correctamente y sin ambigüedades. A su vez, esto desemboca en que un estudio pueda ser tomado por otro interesado y reproducido con su propia base de datos (ISO, 2006a; ISO, 2006b).

Como etapas fundamentales del Análisis del Ciclo de Vida de un proceso o material se definen a los siguientes:

1. Los alcances y objetivos que se quieren abordar con el estudio que se lleva a cabo.
2. El inventario, el cual contiene todos los datos para el estudio, tanto de entrada como de salida.
3. La evaluación de los impactos, que comprende cómo afecta cada uno de los elementos del inventario en el ambiente.
4. La interpretación, que consiste en evaluar cada uno de los datos de salida obtenidos durante el análisis, poder arribar a las conclusiones debidas del caso y plantear mejoras en el sistema de estudio.

Se aprecia que cada uno de estos puntos tiene vital importancia en un análisis que se quiera realizar de un proceso o material. Cada ítem debe ser evaluado correctamente, ya que la omisión en alguno de los puntos puede llevar a equivocaciones y datos incorrectos en el resto del análisis.

2.1 Consumos y emisiones

Cada vez que se realiza un análisis de ciclo de vida para evaluar las aptitudes de un sistema en cuestión, ya sea por los pros y/o contras que tenga un proyecto, se debe cuantificar sus consumos y emisiones.

Cuando se habla de consumos, se tiene en cuenta todos los ingresos de energía para poder realizar un proceso específico. Por ejemplo, se tienen los consumos para extraer materia prima para confeccionar los materiales intervinientes en una mezcla asfáltica. La elaboración de la propia mezcla asfáltica en planta es una fuente importante de consumo y emisiones. Otro punto a considerar, deriva de los consumos necesarios para poder materializar el pavimento en su sitio. Desde pavimentadoras hasta rodillos lisos y neumáticos, incluyéndose los camiones de carga que transportan los materiales a utilizar. Es importante tener en cuenta los rendimientos de cada maquinaria para reducir el consumo y emisiones, y para maximizar la producción. Nahvi et al. (2019) especifica que este apartado es uno de los que más contribuyen a los consumos globales del sistema.

Por otro lado, las emisiones que genera el sistema en cuestión es el otro punto relevante a tener en cuenta. Según el análisis que se realice se pueden abordar diferentes emisiones, pero la más común para la mayoría de los autores son las de los gases potenciales de efectos invernadero (GWP por sus siglas en inglés).

Esta evaluación, conjuga tres gases a tener en consideración. El dióxido de carbono (CO_2) es uno de los indicadores más comúnmente buscados en los estudios de análisis de ciclo de vida de pavimentos. Si bien su impacto por unidad de masa no es el mayor en cuanto a contaminación, si es el que se produce en mayor cantidad y más contaminación genera. Los otros dos gases que conforman el GWP son el metano y el óxido nitroso, de mayor incidencia que el dióxido de carbono, pero generados por la industria en menor proporción.

Los parámetros mencionados anteriormente, son los más utilizados para cuantificar el impacto realizado al medio ambiente. En función del origen del estudio, cada uno de estos gases tienen un coeficiente de ponderación para unificarlos en un solo parámetro. Posiblemente por su facilidad para obtener estos valores, son los más buscados por los autores para realizar los estudios y comparaciones entre las distintas opciones a ser consideradas. Una de las caracterizaciones más utilizadas es la ejemplificada en la Ecuación 1, utilizada por Araujo (2014).

$$GWP = CO_2 + 23 CH_4 + 296 N_2O$$

[Ecuación 1]

Cabe destacar, que también se utilizan otras categorías para cuantificar el impacto ambiental realizado por los procesos a evaluar, seleccionados en menor cantidad de trabajos, pero no por eso menos importantes. Por citar algunos, se produce la eutrofización del sistema acuático, reducción de ozono y toxicidad humana.

3. ESTADO DEL ARTE

En la amplia mayoría de los estudios referidos el LCA de un pavimento sigue un diagrama como el que muestra la Figura 1, en él se pueden ver cada una de las fases que se tienen en consideración. En principio, se tiene una fase de extracción de materiales referida a los materiales vírgenes, a continuación se lleva a cabo la fase de producción de la mezcla asfáltica, luego la fase constructiva en la que se materializa la obra a construir, se continua por una fase de uso en la cual el sistema se encuentra en estado adecuado para la utilización por parte de los usuarios, y una fase de fin de ciclo en la cual se opta por disponer el material que ya cumplió su ciclo, o se lo recicla para futuros sistemas. El bagaje que se puede hacer en estas unidades no tiene un límite específico, pudiéndose adentrar tanto como se desee. El ciclo total del proceso de las mezclas asfálticas es aquel

que se puede observar que encierra todos los procesos. Para este sistema se hacen necesarios los ingresos de consumos y, como resultados, se obtienen las emisiones liberadas; según lo debatido en el apartado anterior.

Las unidades funcionales en un análisis de ciclo de vida evidencian un proceso fundamental que puede variar, en función de los materiales implicados y de las adiciones que se vayan a utilizar en el proceso. En la Figura 2, entre cada una de las unidades funcionales marcadas con línea punteada existe un proceso de transporte; el cual no se debe desestimar, ya que implica tanto consumo de recursos como emisiones. Estas unidades están vinculadas con las distancias que se deban recorrer, así como la eficiencia energética de cada transporte que realice la operación. Por ende, en este análisis, entra en juego la estratégica ubicación de la extracción de materia prima, la elección de la planta asfáltica a utilizar y los vehículos correspondientes que lleven a cabo la tarea.



FIGURA 1

Fases de evaluación.

Fuente: elaboración propia

En la mayoría de los casos, realizar un LCA resulta una tarea exhaustiva en todas sus etapas. Por eso se puede recurrir a *software* que llevan adelante eficientemente dichas tareas. En cuanto a programas de LCA aplicados a la temática, se puede contar con SEVE (*French Association of Road Contractors*), ROAD-RES (Birgisdottir) y PaLATE (*University of California*, el cual está presentado en una planilla de Excel de muy resolutive interfaz). Sin embargo, se tiene que apuntar a que el LCA no sea un análisis aislado. El mismo debe integrarse en los diseños estructurales de pavimentos, en los cuales las tendencias actuales llevan a recurrir a análisis empírico-mecanicistas (BackVid, PitraPAVe, MEDINA, CR-ME Flexible, 3D MOVE análisis, etc.). En base a los distintos resultados, se debe analizar cuál ofrece un mejor desempeño en cuanto al ciclo de vida, teniéndose en cuenta las funciones de desempeño y, posiblemente, una rehabilitación programada para cierta vida útil.

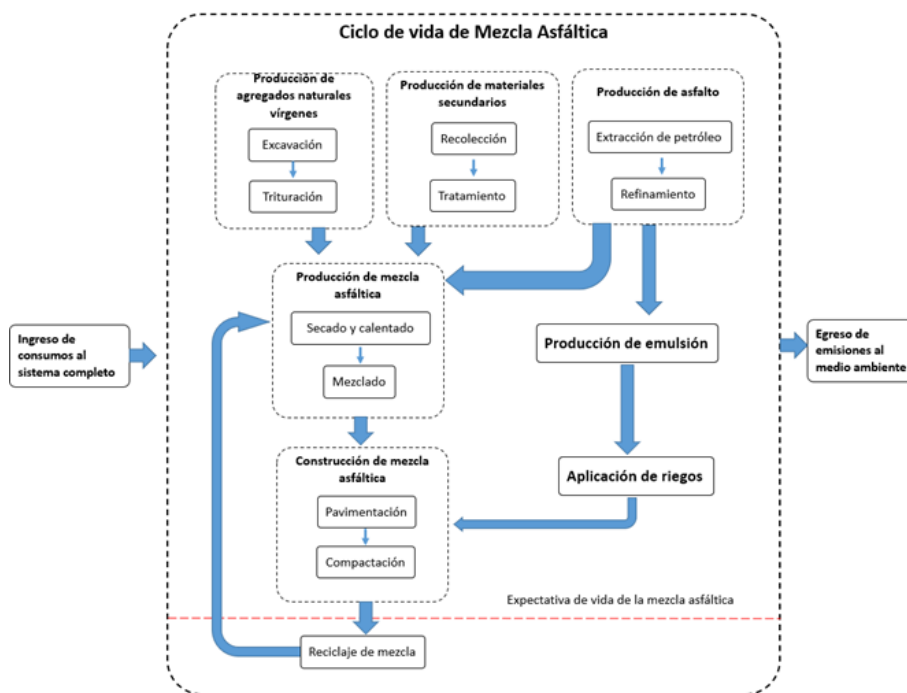


FIGURA 2
Ciclo de vida de la mezcla asfáltica
Fuente: elaboración propia

3.1 Residuos utilizados en la conformación de mezclas asfálticas

Una de las mayores tendencias en investigación sobre pavimento, es la incorporación de residuos o productos que hayan cumplido su ciclo en otros procesos. En este sentido, se ahonda en los beneficios que puede traer a las mezclas asfálticas, suelo, estabilizados, etc. Si bien, en principio, la utilización de un residuo aparece como una ventaja, en algunos casos no queda del todo claro si los consumos y emisiones son de mayor cantidad, más allá de la ventaja técnica que tenga su adición. En este caso, la aplicación del LCA en un modelo base, en contraposición con uno que tenga dicho residuo, permite ver los alcances de los beneficios que se buscan.

En esta línea, uno de los residuos más buscados para la incorporación, ya sea a las mezclas o al asfalto utilizado, es el neumático fuera de uso (NFU). A lo largo de los distintos estudios encarados por investigadores, se pueden evidenciar los amplios beneficios que le otorgan a las mezclas asfálticas, ya sea como mejorar su resistencia al ahuellamiento y a la fatiga, principalmente. Algunos estudios encarados con bajo porcentaje de este residuo evidencian una notoria mejora en las propiedades de macrotextura y reducción sonora al paso del tránsito en su aplicación en microaglomerados (mezclas de bajo espesor, no estructurales), obteniéndose resultados muy cercanos a los conseguidos con un asfalto modificado (Botasso y Segura, 2013). Más recientemente, se ha conseguido modificar asfaltos con altas tasas de NFU (Figura 3), llegándose a un límite cercano al 22 % sobre el peso de asfalto. Si bien esto lleva en primera instancia a una mezcla confeccionada con mayor temperatura y gasto energético, las propiedades finales obtenidas se traducen en un pavimento más duradero, de mejores prestaciones y con menores intervenciones (Segura et al., 2020).



FIGURA 3
Muestra de NFU
Fuente: Segura et al. 2020

Araujo et al. (2014), realiza un exhaustivo estudio para analizar el ciclo de vida de un pavimento tipo, referido a un tránsito estándar; el cual modeliza a partir de las propiedades básicas de los materiales constituyentes, como lo son el módulo y su relación de poisson, etc., En base al estudio se determina que la incorporación de residuos, como RAP, a la mezcla asfáltica reduce drásticamente las emisiones de gases en casi un 40 % en comparación con una mezcla en caliente convencional en su fase constructiva.

Tokede et al. (2020) explora los beneficios del RAP y analiza si es posible la utilización en un porcentaje completo para la confección de carpeta de rodadura para su utilización. Sin duda, los beneficios contra una mezcla convencional son muchos, ya que se descarta por completo la utilización de materiales vírgenes para su extracción. Por ende, su investigación lo que pretende analizar es la calidad del material y si alcanza a obtener los estándares de una mezcla convencional para que sea utilizada en un pavimento (Tokede et al., 2020; Silva et al., 2012). Otros estudios se llevan a cabo con la inclusión de RAP y aceite ya utilizado (Figura 4), permitiendo esta combinación su utilización a temperatura ambiente; una solución para vías de bajo tránsito, con un consumo ampliamente menor en comparación con una mezcla convencional. Esta conjunción de dos desechos arriba a buenos resultados en cuanto a desempeño, lo que permite tener tanto una solución de bajo costo y redituable, como ampliamente amigable con el medio ambiente (Rivera et al., 2021).

Sayagh et al. (2010), utiliza residuo de escoria de la industria del acero para pavimentos y evalúa los beneficios que producen mediante el LCA. También busca implementar una metodología adecuada para normalizar el estudio del LCA en el ámbito de pavimentos en Francia. Luego del análisis, determina que la incorporación de este residuo, si bien mejora la durabilidad de la mezcla, requiere una mayor cantidad de material virgen. Esto lleva a estudiar cada caso particular para ponderar ambos análisis y elegir si es conveniente su utilización.

Schlegel et al. (2016) realiza un estudio de la aplicación de lima hidratada en un cierto porcentaje como agregado para una mezcla asfáltica. También realiza un repaso de las diferentes publicaciones en Europa que abordan el análisis de ciclo de vida en pavimentos. Como resultado, en la fase constructiva se puede reducir un 23 % la cantidad de emisiones generadas y en un 43 % los consumos requeridos, en comparación con una mezcla en caliente típica. Enfoque fundamental sobre el proceso de fabricación de las mezclas.



FIGURA 4

RAP utilizado en conjunto con aceite de automóvil, colocado con terminadora

Fuente: Rivera et al. (2021)

3.2 Mezclas asfálticas tibias

Otro punto de aplicación para realizar un LCA, es en la utilización de mezclas tibias para los pavimentos. Este tipo de tecnología, incorporada hace un tiempo atrás, para poder reducir la temperatura con la que se realizan las mezclas asfálticas, consiste en incorporar un agente reductor de viscosidad para poder trabajar en un rango de temperaturas de los 120 °C, en lugar de los 160-180 °C de una mezcla convencional.

Gulotta (2019) realiza una recopilación comparativa entre las formas de evaluar un proyecto en el pasado versus los beneficios incluidos por las tecnologías que existen hoy en día para la modificación de los materiales para pavimentos en la incorporación de variedad de residuos. Aborda a la conclusión que, mediante el análisis de ciclo de vida, se pueden cuantificar con buena precisión, la inclusión de residuos en las mezclas asfálticas, y el impacto de los mismos en el medio ambiente.

Santos et al. (2018) evalúa la aplicación de mezclas tibias con altas tasas de incorporación de RAP, para mostrar que es una de las soluciones más promisorias, analizadas por medio del LCA. Realiza un amplio análisis para cuantificar el calor necesario con el cual poder constituir la mezcla asfáltica. En el texto pone de manifiesto los beneficios de incorporar RAP en distintas proporciones y reducir la temperatura de las mezclas.

3.3 Casos de aplicación y otros análisis

Santero et al. (2011a), uno de los precursores de la aplicación del ciclo de vida en los pavimentos, plantea en una revisión los conceptos más importantes a desarrollar en un análisis de este tipo. En este trabajo se desandan las principales consideraciones que hay que tener en cuenta a la hora de evaluar el LCA en los pavimentos y analiza, fundamentalmente, el impacto que tienen en las emisiones los pavimentos de grandes tránsitos contra vías de menor envergadura. En otro estudio del mismo autor, ya se empieza a vislumbrar un buen futuro para los estudios del LCA para los pavimentos. A pesar de los beneficios, no deja de lado la falta de estudios que puedan poner en un mismo plano varias evaluaciones de ciclo de vida en varios países. Hoy

en día, esta es una falencia que no se puede salvar del todo. Como ya se dijo, si bien existen normas ISO que regulan las evaluaciones del ciclo de vida en general, faltan reglamentaciones específicas en el ámbito de la pavimentación. Sin embargo, esto no es trabajo solamente de investigadores o desarrolladores, sino que tiene que ir de la mano de los gobiernos que instrumenten políticas eco-eficientes para las obras que se desarrollan en el país (Santero et al., 2011b). También se compara entre los distintos parámetros de análisis de ciclo de vida, aplicado en particular a la sensibilidad de bajo o alto tránsito. También se realiza un análisis del mejor y peor escenario propuesto por cada una de las variables que se ponen en juego, como lo son las propiedades de los materiales, espesores, etc. (Santero y Horvath, 2009).

Huang et al. (2009) analiza un caso de aplicación en Inglaterra. Conforman un análisis detallado de las emisiones que realiza cada tipo de vehículo, según la normalización internacional que posea. Esta particularidad, determina las cantidades de consumo y emisiones que tengan los vehículos. Este análisis abre una importante puerta en función de la localización de cada evaluación, en la fase de uso del LCA. Gschösser et al. (2014) evalúa, mediante un estudio minucioso, el caso de pavimentos típicos de Suiza, al realizar una comparación entre pavimentos flexibles y rígidos. Además, evalúa las maquinarias involucradas en cada proceso constructivo del pavimento, ya sea para pavimento flexibles, rígidos o compuestos. Determina mediante el análisis de ciclo de vida que las maquinarias utilizadas en la fase de producción de la materia prima es la que lleva a un mayor impacto ambiental.

Araujo et al. (2014), con una recopilación de datos de entrada, determina en función de las fórmulas establecidas por Shell, mediante el *software* BISAR de diseño mecanicista, la falla que sufriría el pavimento, definiéndose si llegaría a cumplirse su vida útil por fatiga y deformación permanente. Posteriormente, como un avance importante a la hora de tener en cuenta LCA, se analiza mediante el ensayo de *Wheel Tracking Test* el consumo de energía que tenía el equipo, pudiéndose establecer alguna correlación con el desempeño de los vehículos a escala real en el campo. En el trabajo se ponen en contrapunto dos cuestiones no menores: la mayor macrotextura que tiene el concreto asfáltico le da un aporte fundamental a la seguridad del tránsito vehicular, pero sin duda la fricción aportada le da una resistencia al avance que lleva a un consumo mayor de combustible.

Por otra parte, si bien los lineamientos básicos de un análisis de LCA ya están planteados, varios autores (Heidari et al., 2020; Lu et al., 2019; Santos et al., 2018; Liu et al., 2020; Zheng et al., 2020; Santero et al., 2011) se introducen en la búsqueda de relacionarlos con parámetros más conocidos en el ámbito de los pavimentos. El más buscado, se refiere al Índice de Rugosidad Internacional (IRI) establecido por el Banco Mundial para marcar un estatus de calidad al avance del tránsito. El indicador, contabilizado en unidades de m/km, permite evidenciar los desniveles que presenta un tramo a considerar. Partiéndose de niveles de IRI bajos, de 2-3 m/km, para pavimentos recién construidos, hasta valores de 13-14 m/km para pavimentos en estado de fin de vida útil. De esta forma, varios estudios realizados pueden relacionar empíricamente la variación de IRI con un aumento del consumo de combustible y, por ende, de emisiones de gases por parte de los vehículos. Esto se aplica a la fase de uso, vista en la Figura 2, que tiene en cuenta el consumo y emisiones de los vehículos que transitan por el caso en estudio.

Xu et al. (2019) analiza la fase de uso en el ciclo de vida de los pavimentos, teniendo en cuenta el incremento de gases potenciales de efecto invernadero debido a la variación de IRI y por el ahuellamiento que genera cambios a nivel estructural. Involucra en el análisis, la carbonatación del hormigón como fuente receptora de CO₂ y, además, la eficiencia de la iluminación que se colocan en las carreteras. También analiza la sensibilidad en cuanto a las emisiones de CO₂ mayores en pavimentos flexibles que en pavimentos rígidos.

3.4 Situación Regional

En cuanto a América Latina, el desafío es un más complejo. Países como Brasil poseen políticas de energías renovables, las cuales impulsan notoriamente la implementación de vehículos eléctricos. Sin embargo, países

como Chile y Argentina, tienen dificultades no solamente por estar volcados a una política de energía basada en combustibles fósiles, sino también por ser territorios con grandes extensiones, que implican un cambio en la infraestructura de provisión de energía a los automotores. Sin duda, cada país tiene por delante desafíos diferentes por afrontar a la hora de reducir emisiones de gases. Según la Asociación Argentina de Vehículos Eléctricos y Alternativos de Argentina (AAVEA), a 2020, en el país 135 son los vehículos eléctricos patentados, 266 los enchufables y 3376 híbridos convencionales. A la fecha, la venta de vehículos 0 kilómetro con motorización híbrida o eléctrica aumentó en el primer trimestre de 2021 un 186% y alcanzó un total de 6.618 vehículos, de acuerdo con el relevamiento que realiza el Sistema de Información Online del Mercado Automotor de Argentina (SIOMAA).

Actualmente, en Argentina las normativas sobre el impacto ambiental en las obras de estas medidas no están aún muy claras. En 2017, se inicia una reglamentación propuesta por el gobierno de la nación para comenzar a implementar estas cuestiones, tan fundamentales a la hora de la evaluación ambiental. Actualmente, está más avanzado el análisis e implementación sobre el ámbito de la construcción civil, otro ambiente en el cual se genera una gran huella sobre el medioambiente. Sin duda es un camino a desandar, no solo en el ámbito vial, sino a cualquier escala que involucre un proceso industrial que permita su evaluación (Manual de implementación de la metodología de Ciclo de Vida en la construcción, 2020).

Dentro de los compromisos asumidos por Argentina en materia de mitigación de emisiones, se encuentra la ratificación nacional del Acuerdo de París, en septiembre de 2016. Ese mismo año, durante la vigésimo segunda Conferencia de las Partes, el país presentó la actualización de los parámetros de emisiones. En ella, la Argentina estableció una meta absoluta de no exceder la emisión neta de 483 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente en el año 2030 (Tercer Informe Bienal de la República Argentina, 2020).

4. CONCLUSIONES

Hoy en día no existe un sistema único que pueda establecer una real comparación entre distintos sistemas evaluados. Las normativas ISO, si bien son de gran utilidad, tienen que avanzar hacia una evolución de la norma ISO 14040/2006 e ISO 14044/2006, y llegar a concretar una regulación específica en materia de pavimentos.

Como puntos importantes para la evaluación del ciclo de vida en particular en el análisis del ciclo de vida, dentro de las investigaciones revisadas, se mencionan la resistencia al rodamiento, la carbonatación, la lixiviación, el albedo y la iluminación. A grandes rasgos se puede imaginar que el mayor aporte de emisiones se podría deber a la extracción de materiales naturales o su fase constructiva. Sin embargo, los otros estadios de evaluación también generan un gran impacto en el total del análisis. Para la fase de uso, se evalúa el aumento de contaminación por parte del tránsito, en el cual se involucra un aumento del IRI (parámetro fundamental para la evaluación de pavimentos) en lo que resulta una forma práctica de vincular un parámetro de análisis de los pavimentos con el LCA. Si bien la incorporación de un residuo puede evidenciar una mejora física, química o mecánica en el comportamiento in-situ, resta saber si esta adición resulta beneficiosa en términos ambientales en un panorama mucho más amplio. Sin duda, los análisis del LCA permiten evidenciar la eficacia que tiene un aditivo y/o residuo en una mezcla asfáltica.

Se espera que, en los próximos años, la metodología del LCA, sea de amplio conocimiento en el campo de los pavimentos, tanto asfálticos como de otras clases. También es importante que exista una articulación de ambos procedimientos dentro del análisis de diseño estructural a realizar. Implementándolo en forma vinculativa con el proceso de elección de materiales, estimación de tránsito y predicciones de desempeño, se espera que se tuvieran beneficios, no solo económicos, sino también ambientales, en pos de elegir la mejor opción.

REFERENCIAS

- Araújo, J. P. C., Oliveira, J. R., & Silva, H. M. (2014). The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 32, 97-110.
- Babashamsi, P., Yusoff, N. I. M., Ceylan, H., Nor, N. G. M., & Jenatabadi, H. S. (2016). Evaluation of pavement life cycle cost analysis: Review and analysis. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(4), 241-254.
- Botasso, G., & Segura, A. (2013). Estudio experimental de microaglomerado asfáltico antiderrapante modificado con NFU. *Obras y proyectos*, (14), 36-44.
- Cao, R., Leng, Z., & Yu, H. (2019). *Comparative Life Cycle Assessment of Warm Mix Technologies in Asphalt Rubber Pavements Incorporated with Uncertainty Analysis* (No. 19-03712).
- Galatioto, F., Huang, Y., Parry, T., Bird, R., & Bell, M. (2015). Traffic modelling in system boundary expansion of road pavement life cycle assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 36, 65-75.
- Gulotta, T. M., Mistretta, M., & Praticò, F. G. (2019). A life cycle scenario analysis of different pavement technologies for urban roads. *Science of the total environment*, 673, 585-593.
- Gschösser, F., Wallbaum, H., & Adey, B. T. (2014). Environmental analysis of new construction and maintenance processes of road pavements in Switzerland. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(1), 1-24.
- Heidari, M. R., Heravi, G., & Esmaeeli, A. N. (2020). Integrating life-cycle assessment and life-cycle cost analysis to select sustainable pavement: A probabilistic model using managerial flexibilities. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120046.
- Huang, Y., Bird, R., & Heidrich, O. (2009). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 17(2), 283-296.
- International Standard Organization (ISO) (2006a). ISO 14040: 2006. International Standard ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment: Principles and Framework, October. International Organization for Standardization, Geneva (Switzerland).
- International Standard Organization (ISO) (2006b). ISO 14044:2006. International Standard ISO 14044: Environmental Management - Life Cycle Assessment: Requirements and Guidelines, October. International Organization for Standardization, Geneva (Switzerland).
- Kucukvar, M., & Tatari, O. (2012). Ecologically based hybrid life cycle analysis of continuously reinforced concrete and hot-mix asphalt pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(1), 86-90.
- Li, J., Xiao, F., Zhang, L., & Amirkhanian, S. N. (2019). Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. *Journal of Cleaner Production*, 233, 1182-1206.
- Liu, J., Li, H., Wang, Y., & Zhang, H. (2020). Integrated life cycle assessment of permeable pavement: Model development and case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 85, 102381.
- Lu, G., Wang, Y., Li, H., Wang, D., & Oeser, M. (2019). The environmental impact evaluation on the application of permeable pavement based on life cycle analysis. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 8(4), 351-357.
- Ma, F., Sha, A., Lin, R., Huang, Y., & Wang, C. (2016). Greenhouse gas emissions from asphalt pavement construction: A case study in China. *International journal of environmental research and public health*, 13(3), 351.
- Ma, F., Dong, W., Fu, Z., Wang, R., Huang, Y., & Liu, J. (2020). Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Asphalt Pavement Maintenance: A Case Study in China. *Journal of Cleaner Production*, 125595.
- Ministerio de Desarrollo (2020). Tercer Informe Bienal de la República Argentina. República Argentina. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/cambio-climatico/tercer-informe-bienal>
- Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda (2020). Manual de implementación de la metodología de Ciclo de Vida en la construcción. *Presidencia de la Nación*. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/desarrollo-sostenible/vivienda/ciclo-de-vida>

- Nahvi, A., Pyrialakou, V. D., Anand, P., Sadati, S. S., Gkritza, K., Ceylan, H., ... & Taylor, P. C. (2019). Integrated stochastic life cycle benefit cost analysis of hydronically-heated apron pavement system. *Journal of Cleaner Production*, 224, 994-1003.
- Nascimento, F., Gouveia, B., Dias, F., Ribeiro, F., & Silva, M. A. (2020). A method to select a road pavement structure with life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122210.
- Rivera, J., Barbeito, S.A., Porro, A.R. (2021). Use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) and oilyresidues as pavement at low temperatures for low traffic roads. *Academia Letters*, Article 972.
- Santero, N. J., & Horvath, A. (2009). Global warming potential of pavements. *Environmental Research Letters*, 4(3), 034011.
- Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011a). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9-10), 801-809.
- Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011b). Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9-10), 810-818.
- Santos, J., Bressi, S., Cerezo, V., Presti, D. L., & Dauvergne, M. (2018). Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 283-297.
- Sayagh, S., Ventura, A., Hoang, T., François, D., & Jullien, A. (2010). Sensitivity of the LCA allocation procedure for BFS recycled into pavement structures. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(6), 348-358.
- Segura, A., Botasso, G., Raggiotti, B., Rebollo, O., Zapata Ferrero, I. (2020) Obtención de asfalto altamente modificado con polvo de NFU. *XXXIXª Reunión del Asfalto*.
- Schlegel, T., Puiatti, D., Ritter, H. J., Lesueur, D., Denayer, C., & Shtiza, A. (2016). The limits of partial life cycle assessment studies in road construction practices: A case study on the use of hydrated lime in Hot Mix Asphalt. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 141-160.
- Silva, H. M., Oliveira, J. R., & Jesus, C. M. (2012). Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving? *Resources, Conservation and Recycling*, 60, 38-48.
- Tokede, O. O., Whittaker, A., Mankaa, R., & Traverso, M. (2020). Life cycle assessment of asphalt variants in infrastructures: The case of lignin in Australian road pavements. *Structures*, 25(junio), 190-199
- Transportation Officials. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993* (Vol. 1). AASHTO.
- Umer, A., Hewage, K., Haider, H., & Sadiq, R. (2017). Sustainability evaluation framework for pavement technologies: An integrated life cycle economic and environmental trade-off analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53, 88-101.
- Ventura, A., & Jullien, A. (2009). Life Cycle Assessment applied to road pavements: an analysis of method and results relevancy. Mairepav 6 the Sixth International Conference on maintenance and rehabilitation of pavements and technological control. Torino, Italy. https://www.researchgate.net/publication/257536831_Life_Cycle_Assessment_Applied_to_Road_Pavements_An_Analysis_of_Method_and_Results_Relevancy
- Xu, X., Akbarian, M., Gregory, J., & Kirchain, R. (2019). Role of the use phase and pavement-vehicle interaction in comparative pavement life cycle assessment as a function of context. *Journal of Cleaner Production*, 230, 1156-1164.
- Zheng, X., Easa, S. M., Ji, T., & Jiang, Z. (2020). Incorporating uncertainty into life-cycle sustainability assessment of pavement alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121466.