

Metodología para la evaluación del impacto ambiental del hormigón elaborado aplicado a la región metropolitana de Buenos Aires

G. Cordoba^{a,b*}, C. I. Paulo^{a,b}, E. F. Irassar^{a,b}

^aCentro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CIFICEN, UNCPBA-CICPBA-CONICET), CP B7400JWI, Olavarría, Argentina. gcordoba@fio.unicen.edu.ar

^bUniversidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA), Facultad de Ingeniería, Estudios Físicos, Químicos y Mecánicos de Materiales (INMAT), CP B7400JWI, Olavarría, Argentina. cpaulo@fio.unicen.edu.ar, firassar@fio.unicen.edu.ar

Recibido: 1 de junio de 2023

Aceptado: 28 de junio de 2023

RESUMEN

Este trabajo analiza el consumo de materiales y el impacto ambiental del hormigón elaborado en la Región Metropolitana de Buenos Aires en 2019, mediante un análisis del flujo de materiales y un análisis de ciclo de vida (ACV). La composición media del hormigón se estimó mediante encuestas realizadas a productores de hormigón elaborado. Como indicadores ambientales se utilizaron las emisiones de CO₂ equivalentes (ECO₂eq) y el uso de materiales y energía. También se estudiaron estrategias de reducción del impacto y su influencia en el ACV. Se necesitaron 7,16 Mt de materiales para producir 2.604.862 m³ de hormigón, de los cuales 99,1 % fueron materias primas y 0,9 %, materias primas secundarias. Aproximadamente 78,6 % de los materiales extraídos se destinaron a la producción de agregados. El uso de agregados reciclados contribuye mayormente a reducir el uso de materias primas, mientras que la sustitución del cemento Portland por materiales cementantes suplementarios reduce fundamentalmente las ECO₂eq.

PALABRAS CLAVE: Hormigón elaborado, impacto ambiental, análisis de flujo de materiales, análisis de ciclo de vida

ABSTRACT

This paper analyzes the material consumption and environmental impact of ready-mix concrete in the Metropolitan Region of Buenos Aires in 2019, using a material flow analysis and a life cycle assessment (LCA). The average composition of concrete was estimated through surveys of ready-mix concrete producers. CO₂ equivalent emissions (ECO₂eq) and the use of materials and energy were considered as environmental indicators. Impact reduction strategies and their influence on the LCA were also explored. 7.16 Mt of materials were needed to produce 2,604,862 m³ of concrete, of which 99.1 % were raw materials and 0.9 % were secondary raw materials. Approximately 78.6 % of the extracted materials were used to produce aggregates. The use of recycled aggregates contributes mostly to reducing the use of raw materials, while the substitution of Portland cement with supplementary cementitious materials mainly reduces ECO₂eq.

KEYWORDS: Ready-mix concrete, environmental impact, material flow analysis, life cycle assessment

*Autor de correspondencia

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Cordoba, G., Paulo, C. I., y Irassar, E. F. (2023). Metodología para la evaluación del impacto ambiental del hormigón elaborado aplicado a la región metropolitana de Buenos Aires. *Revista Hormigón*, 64, 5–23. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/pag9z0dz5>

1. Introducción

América Latina y el Caribe (AL&C) es una región en vías de desarrollo caracterizada por una gran disparidad económica y un elevado riesgo climático [1]. A nivel mundial, se estima que el 55,3 % de la población vive en zonas urbanas, cifra que alcanza el 80,7 % en AL&C. Además, el 20 % de la población urbana vive en mega- y grandes ciudades (>5 millones de habitantes) [2]. Esta población requiere habitación, servicios y medios de transporte que le permitan alcanzar el bienestar y promuevan el desarrollo sostenible de las ciudades. La construcción de vivienda y la mejora de la infraestructura nueva y/o existente conllevan una gran demanda de materiales de construcción [2]. Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) [3], en 2060 se consumirán 82 Gt de materiales no metálicos, la mayoría de ellos materiales de construcción. Además, la industria de la construcción es responsable del ~11 % de los gases de efecto invernadero (GEI), y la renovación, reparación y demolición de estructuras genera una gran cantidad de residuos (RCD) cuando no se gestionan adecuadamente [3-7]. Sin embargo, la reducción del consumo de materiales de construcción no parece viable ni sostenible si se requiere garantizar el acceso a un entorno construido moderno y seguro a toda la población [2,8,9]. Por consiguiente, las estructuras deberán diseñarse para reducir el consumo de materiales y las emisiones de CO₂ per cápita y garantizar la mitigación del cambio climático para la región [1].

La sostenibilidad de la construcción ha despertado el interés de la comunidad científica y se han realizado estudios desde distintas perspectivas empleando diferentes metodologías. Numerosas investigaciones se basan en el Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Ésta es una técnica valiosa para evaluar los impactos ambientales potenciales de un sistema de producto, desde la adquisición de la materia prima hasta su disposición final (de

la cuna a la tumba) [10]. El ACV constituye un medio para medir los impactos ambientales y compararlos, usando diferentes categorías, para tomar decisiones basadas en el diseño ecológico, la optimización de procesos y la gestión de la cadena de suministro [11,12]. Debido a la relevancia de la emisión de CO₂ generada por los materiales cementíceos, los estudios de ACV se han orientado principalmente a reducir dichas emisiones procedentes del cemento Portland [13]. Sin embargo, también se ha abordado la reducción del impacto ambiental del cemento Portland medido mediante otros factores además de la emisión de CO₂ [13-17], como en la producción de hormigón [18-21] o en los elementos estructurales y las estructuras de hormigón armado [22-24]. Los métodos de evaluación del impacto ambiental basados en el ACV sólo consideran los minerales metálicos en la categoría de "escasez de recursos", ya que consideran que la disponibilidad de minerales no metálicos es ilimitada [25]. Esta suposición es válida a nivel mundial, pero no a nivel regional, especialmente, si se tiene en cuenta que el 93,2 % de la composición de una estructura está formada por minerales no metálicos [25-27].

La aplicación de la metodología del análisis del flujo de materiales (AFM) es fundamental para evaluar el impacto de la industria de la construcción en la escasez de recursos naturales. Con este fin, Reis et al. [9] han estudiado el AFM de materiales cementíceos en Brasil, y se han publicado algunos estudios para cuantificar el stock urbano de materiales [28,29]. Sin embargo, la aplicación de una metodología a la vez no permite realizar una evaluación completa del impacto ambiental [7,30]. Diferentes investigaciones proponen metodologías que combinan el ACV y el AFM, especialmente en modelos de economía circular y cálculo de stock urbano [7,30-32]. Por otro lado, los estudios que analizan las posibles soluciones para reducir el impacto ambiental en ciertos puntos críticos del ciclo de vida del hormigón [33-35], no han

realizado un análisis cuantitativo empleando las metodologías ACV y AFM combinadas para evaluar el efecto de aplicar distintas estrategias de reducción del impacto.

Este trabajo propone una metodología basada en la realización simultánea del análisis de flujo de materiales y la evaluación del ciclo de vida para analizar cuantitativamente el impacto ambiental causado por cambios en el origen de las materias primas en la producción regional de hormigón elaborado. La metodología puede aplicarse en cualquier región que cuente con la información detallada acerca de la producción de hormigón elaborado, y en este trabajo se presenta como caso de estudio la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA).

2. Metodología

La Fig. 1 muestra el esquema de las fases metodológicas propuestas para evaluar el impacto ambiental de la industria del hormigón elaborado utilizando conjuntamente las metodologías de *análisis de flujo de materiales* y *análisis de ciclo de vida*. La metodología propuesta se diseñó para identificar los puntos críticos del sistema y

evaluar cuantitativamente la efectividad del uso de adiciones minerales y agregados reciclados para reducir el impacto ambiental.

La *fase uno* comprende la definición del sistema objeto de estudio (Sección 2.1). Esta fase es de suma importancia y describe la naturaleza de la industria del hormigón elaborado y su importancia económica y social en la región.

La *fase dos* consiste en la adquisición de los datos necesarios para realizar el AFM y el ACV (Secciones 2.2 y 3.1). Los datos sobre la composición y las características del hormigón elaborado consumido en la región se obtienen mediante encuestas a diferentes productores. Debido a la heterogeneidad del tamaño de las empresas y su grado de participación en el mercado, es esencial hacer una selección meticulosa de las empresas a encuestar.

La *fase tres* abarca la construcción del modelo para realizar el AFM y el ACV a partir de los datos recogidos en las encuestas (materiales utilizados, procesos implicados y procesos con sus flujos de materiales de entrada y de salida, conexiones entre los mismos, entre otros detalles del modelo).

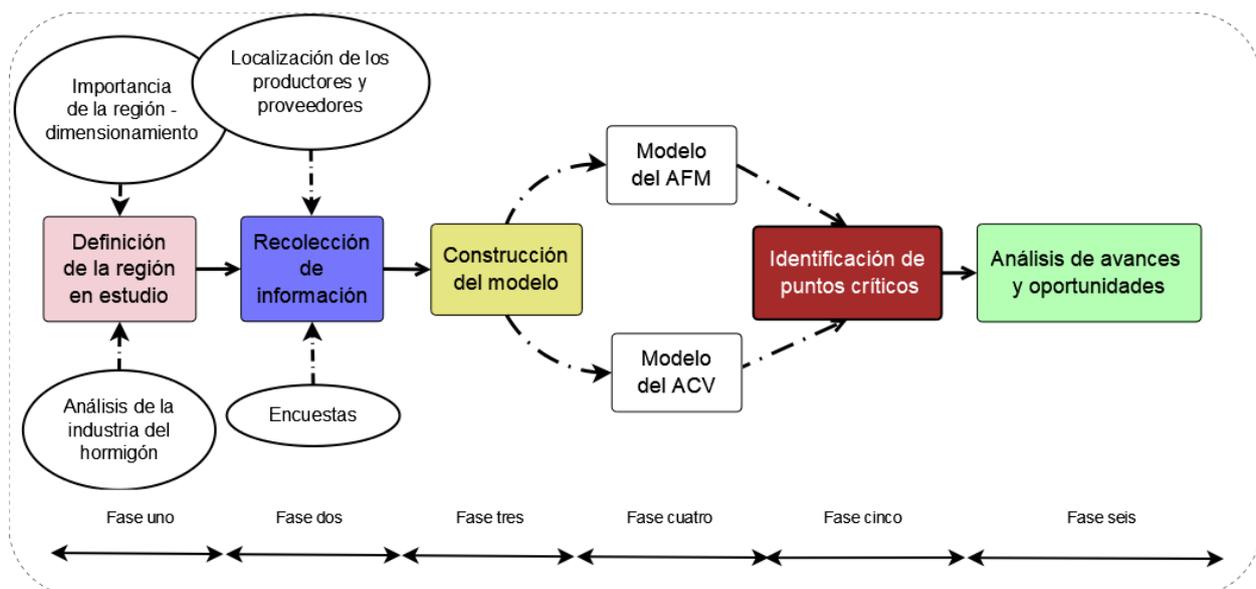


Figura 1. Metodología propuesta para la evaluación del impacto ambiental de la industria del hormigón elaborado.

La *fase cuatro* resuelve el modelo construido en la *fase tres* aplicando las metodologías del AFM y el ACV (Secciones 2.3, 2.4, 3.2 y 3.3). El AFM cuantifica el flujo de materiales a lo largo del ciclo de vida del producto y el ACV es necesario para cuantificar las emisiones de CO₂ equivalentes y la energía utilizada.

La *fase cinco* consiste en identificar los puntos críticos del sistema, detectando los materiales o procesos que más materias primas consumen, que más emisiones de CO₂ equivalente generan, o que utilizan más energía (Secciones 2.5 y 4.1). A pesar de que se ha investigado mucho sobre la reducción del impacto ambiental del cemento Portland y el hormigón, los trabajos normalmente analizan una estrategia a la vez o lo hacen considerando una única metodología. Esto impide comprender de forma integral el significado de la aplicación de ciertas medidas para reducir las emisiones de CO₂ equivalentes, la energía utilizada o el consumo de materias primas. Por lo tanto, se realiza un ACV comparativo considerando la situación actual (Business as usual – BAU), y la incorporación de residuos de la construcción (como agregados reciclados o en forma de adición mineral), bajo tres categorías de impacto: emisiones de CO₂ equivalente, energía utilizada y uso de materia prima.

Finalmente, en la *fase seis* se analizan los resultados de la incorporación de adiciones minerales y el uso de agregados reciclados, y se evalúa cuantitativamente la relevancia en la reducción del impacto ambiental en las tres categorías de impacto propuestas para el estudio.

2.1. Definición del sistema en estudio

El 92 % de la población argentina vive en zonas urbanas, y existe segregación hacia los grandes centros urbanos [36]. La Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA) comprende a la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y los 24 partidos más poblados del

Conurbano Bonaerense y concentra al 31 % de la población del país [36]. Es también uno de los centros de producción y consumo más importantes de América Latina y concentra el 45 % de la actividad económica y el 50 % del Producto Bruto Interno de la Argentina [37,38].

Según la Asociación Argentina de Hormigón Elaborado (AAHE), alrededor del 47,5 % del hormigón elaborado producido en el país durante 2019 fue entregado en la RMBA [39], y, según la Asociación de Fabricantes del Cemento Portland (AFCP), alrededor del 29,5 % del cemento despachado en ese período fue a esta región.

Por lo tanto, debido a la importancia económica y demográfica de la Región, se la toma como caso de estudio.

2.2. Obtención de datos sobre la industria del hormigón elaborado

Se encuestó a tres de los mayores productores de hormigón de la Argentina para la recolección de datos, debido a que, usualmente, productores de hormigón pequeños utilizan una tecnología limitada y ofrecen una gama de calidades de hormigón reducida.

De las encuestas se obtuvieron las clases resistentes del hormigón comercializadas, el tipo, cantidad y procedencia de los materiales componentes (cemento, adiciones minerales, agregados gruesos y finos, aditivos y agua), la energía consumida (tanto eléctrica como los combustibles) y la ubicación de los principales proveedores de dichos materiales.

Luego, se estimaron la composición media por m³ de hormigón y su correspondiente incertidumbre, la distancia de transporte desde el productor del material componente hasta la RMBA, y se registraron los medios de transporte. Se consideraron la carga promedio del mixer de hormigón y la distancia de transporte media desde la planta de hormigón elaborado hasta el lugar de

colocación. Asimismo, se solicitó información acerca del tipo y cantidad de residuos generados en la planta.

2.3. Análisis de Flujo de Materiales (AFM)

El AFM permite evaluar los flujos y stocks de materiales en un sistema en un período de tiempo (considerando usualmente un año) y límites definidos [40,41]. El término “materiales” hace referencia a bienes o sustancias. En este trabajo, el AFM se modela considerando la capa bienes, que pueden definirse como unidades económicas de materia con un valor positivo o nulo. Por ejemplo, el agua de lluvia no tiene un valor económico y toma un valor nulo en el AFM. El sistema se compone de flujos y procesos. Los procesos pueden definirse como un lugar donde ocurren reacciones químicas, transporte de masa y energía, y actividades de almacenamiento. Se adopta el modelo de caja negra, es decir, no se detalla las reacciones o actividades que ocurren dentro del proceso. Sólo se consideran para el modelo las entradas y salidas.

Para la resolución del AFM se utilizó el software libre STAN (abreviatura de subSTance flow ANalysis). STAN se basa en la norma austríaca ÖNORM S 2096 (Material Flow Analysis – Application in Waste Management) y permite construir modelos gráficos utilizando componentes predefinidos (procesos, flujos, límites del sistema). Con este software es posible calcular cantidades desconocidas a partir de la introducción de datos conocidos (flujos de masa, existencias, concentraciones, coeficientes de transferencia), en diferentes capas (bien, sustancia, energía) y períodos, mediante la resolución de balances de masa y energía. Los resultados se presentan en formato Sankey [40].

En la Fig. 2 se presenta un modelo simplificado del flujo de materiales para la producción de hormigón elaborado en la RMBA. El modelo se construyó considerando

únicamente la capa “bienes”, y abarca las entradas de materia prima y materia prima secundaria (definida como materiales y residuos provenientes de la propia industria u otros procesos, que pueden reutilizarse mediante algún tratamiento o tal cual se obtiene), y entre las salidas del sistema se consideran los procesos de producción de cemento Portland (CO_2 liberado durante la clinkerización), trituración de piedra para la producción de agregados naturales, y el mezclado del hormigón (hormigón elaborado y RCD). El proceso de fabricación del cemento Portland incluye a la clinkerización y la molienda como subprocesos, y se consideran como entradas “materia prima del clínker” como un único flujo (incluyendo a la piedra caliza, arcillas, mineral de hierro, cuarzo, entre otros), yeso, filler calcáreo, puzolana natural y escoria granulada de alto horno, y como salidas se considera el CO_2 y los diferentes tipos de cementos Portland. En el proceso “Canteras” se consideran los subprocesos de trituración y clasificación, a los flujos de piedras granítica o dolomítica como entradas, y agregado grueso y arena de trituración como salidas. En la planta de hormigón elaborado se consideran los subprocesos de mezclado y almacenamiento del agua de lavado para el futuro reciclado y reutilización. En este proceso, se consideran como entradas a los cementos Portland comerciales, escoria de alto horno, filler calcáreo, ceniza volante, agregado grueso, arenas naturales y de trituración, agua de red y de lluvia, y aditivos químicos. Entre las salidas, se considera el hormigón elaborado y RCD. Las fracciones de agregados procedentes de canteras que no se utilizan para la producción de hormigón elaborado, el material particulado y el agua evaporada no se tienen en cuenta como una simplificación del modelo, al igual que los residuos domésticos y peligrosos.

2.4. Análisis de ciclo de vida (ACV)

El ACV se divide en cuatro fases:

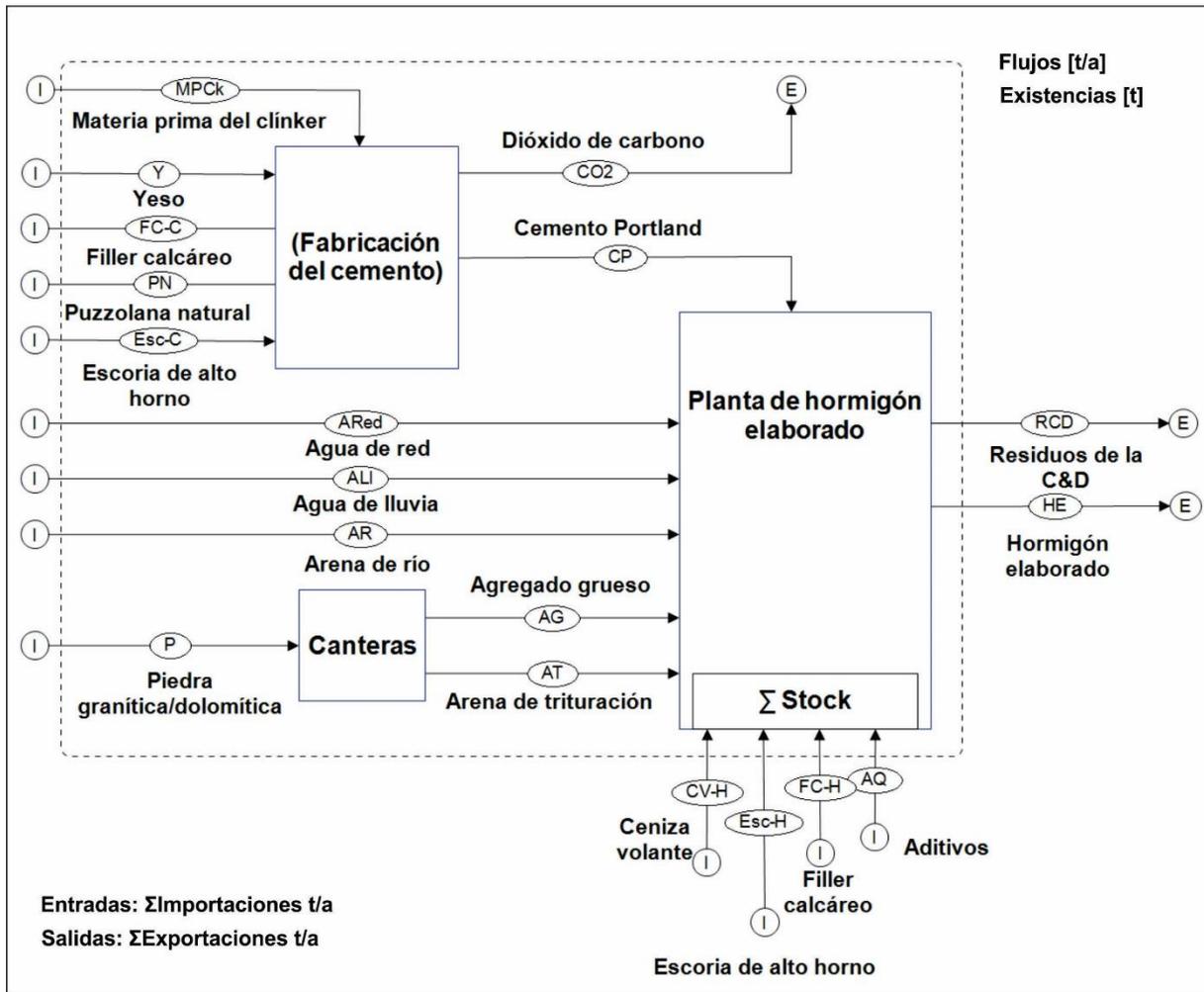


Figura 2. Diagrama de flujo de los materiales.

2.4.1. Definición del objetivo y alcance del estudio

Este estudio tiene como objetivo determinar los impactos ambientales más significativos y las alternativas que podrían reducir dichos impactos. Se toma como unidad funcional 2.604.862 m³ de hormigón elaborado. El ACV se realizó de la cuna a la puerta de la obra. Se incluyeron en el estudio las fases de extracción y producción de los materiales componentes del hormigón, transporte desde los sitios de extracción/producción de los materiales hasta la planta de hormigón elaborado, las etapas de carga y mezclado del hormigón, y distribución desde la planta de hormigón hasta la puerta de la obra. Las etapas de colocación, construcción,

uso y desmantelamiento/demolición de la estructura, reciclado/disposición final de los materiales no se incluyen en el ACV. Como entradas del sistema se consideran los materiales minerales, agua, combustibles y energía eléctrica. Como salidas se consideran las emisiones de CO₂ equivalente. No obstante, se omitieron otros materiales necesarios para el funcionamiento de la planta, como papel y trapos.

2.4.2. Inventario de ciclo de vida (ICV)

El ICV comprende la energía consumida para la producción y el transporte de materiales. Las entradas y salidas del modelo construido en la fase tres se reprodujeron en el software

libre OpenLCA, de una amplia funcionalidad y que permite la creación de bases de datos y métodos de evaluación del impacto propios.

La base de datos para este estudio se generó a partir de datos locales, ya que la matriz energética del país difiere de la utilizada en las bases de datos libres y el transporte es de gran relevancia para los materiales de construcción, en particular para los agregados debido al gran volumen a ser transportado. La base de datos generada por los autores se contrastó con la base de datos ICE (Inventario de Carbono y Energía) [42] para su validación. En los casos en los que no se disponía de los datos, se consultaron referencias bibliográficas.

El polvo del horno de clínker no se computa como salida ya que normalmente se devuelve al proceso de producción de cemento.

2.4.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)

El objetivo de la EICV es comprender y evaluar la magnitud y la importancia de los impactos ambientales potenciales de un sistema. Para ello, se establecieron las categorías de impacto que los autores consideraron más significativas para el sistema en estudio: (i) emisiones de CO₂ equivalente, (ii) uso de energía y (iii) uso de materia prima.

Las categorías seleccionadas para la evaluación de impacto se eligieron en función de su relevancia para la producción de hormigón elaborado y los materiales componentes. Como se ha señalado, la industria de la construcción es responsable de ~11 % de los GEI y muchos estudios de ACV se han centrado en analizar las emisiones de CO₂ equivalentes y las estrategias de mitigación [3-7,43]; la cuantificación del uso de materias primas es fundamental debido al empleo masivo de minerales no metálicos [3,4,7,9,25,26]; y la producción de ciertos materiales componentes del hormigón requiere un uso intensivo de energía [23,25],

por lo que es imprescindible cuantificar e identificar los puntos críticos en cuanto al uso de energía.

Se creó un método personalizado para la determinación del impacto, ya que los métodos tradicionales no cuantifican el uso de materiales minerales no metálicos entre las categorías adoptadas [7,25,26]. El método propuesto por los autores incluye tres categorías de impacto: emisiones de CO₂eq, uso de energía y uso de materia prima.

Las emisiones de CO₂eq se calcularon considerando la ecuación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) [44] (Ecuación 1), donde CO₂eq son las emisiones de CO₂ equivalente, CO₂, CH₄ y N₂O corresponden a la cantidad de dióxido de carbono, gas metano y óxido nitroso emitidos durante el proceso.

$$CO_{2eq} [kg] = CO_2 [kg] + 25 * CH_4 + 298 * N_2O \quad (1)$$

Los factores de emisión resultantes se presentan en la Tabla 1.

Para la determinación del uso de energía se consideró la energía utilizada para producir una tonelada de material o un m³ de hormigón. La energía de entrada se ingresó en MJ o GJ por tonelada de material. El uso de energía por consumo de combustible de los camiones motohormigoneros durante el transporte desde la planta de hormigón elaborado hasta el lugar de colocación, se ingresó como GJ/m³. Los factores de uso de energía considerados en el modelo de medición del impacto fueron 1 GJ/GJ o 35,94 GJ/m³ de combustible.

2.4.4. Interpretación del ciclo de vida

Se evaluaron los resultados del impacto en relación con el objetivo y el alcance del estudio y, se establecieron los puntos del sistema de producto susceptibles de ser mejorados.

Tabla 1. Factores de emisión de los materiales componentes del hormigón.

Material	kg CO ₂ e/t
Cemento Portland Normal (CPN)	912
Agregado grueso de trituración (AG)	46
Arena de trituración (AT)	46
Arena de río (AN) [45]	14
Filler calcáreo (FC) [42]	35
Escoria de alto horno (EAH) [42]	47
Ceniza volante (CV) [42]	35
Agua de red [46]	9
Acero de refuerzo [45]	1990

3. Resultados

A continuación, se presentan los datos obtenidos de las encuestas realizadas a los productores de hormigón elaborado y los resultados del AFM y el ACV.

3.1. Caracterización del hormigón elaborado producido en la RMBA

Se estima que en 2019 se produjeron 2.604.862 m³ de hormigón en la RMBA. Las clases resistentes producidas estuvieron comprendidas entre H8 y H110. Los hormigones H30/H35 son los más representativos (50,8 %). Los H17/H25 y H38/H55 representan el 15,2 % y el 26,8 %, respectivamente, mientras que las clases resistentes más bajas (H8/H15) y más altas (H60/H80/H110) son las menos representativas (6,6 % y 0,6 %, respectivamente).

Los tipos de cemento utilizados en 2019 fueron: cemento Portland normal (CPN), cemento Portland compuesto (CPC), cemento Portland fillerizado (CPF) y, en menor medida, cemento de alto horno (CAH) y cemento Portland puzolánico (CPP), que representan el 47,3 %, 30,9 %, 20,0 %, 1,0 % y 0,9 % del

mercado, respectivamente. Los SCM se incluyen generalmente en el cemento, aunque la escoria de alto horno (EAH), el filler calcáreo (FC) y la ceniza volante (CV) se incorporaron también en las plantas de hormigón para la producción de algunos hormigones especiales. Se adoptó una distancia de transporte de 236 km para la CV, 147 km para la EAH, y un transporte bimodal para el FC (~331 km por tren y ~63 km por camión).

Principalmente, se utilizan agregados naturales como agregados gruesos y finos. Como agregado grueso se utiliza piedra triturada granítica (82,7 %) y dolomítica (17,3 %). En la RMBA, los agregados triturados provienen de canteras ubicadas en el partido de Olavarría, provincia de Buenos Aires. El transporte se realiza principalmente por camión (~355 km) y, en menor medida, utilizando un transporte bimodal (~307 km en tren y ~63 km en camión).

Como agregados finos, se utiliza mayormente arena de río (~90,1 %), con una menor proporción de arena de trituración (~9,9 %). La arena de río suele tener un módulo de finura bajo, y proviene de la zona norte de la provincia de Buenos Aires o de la zona sur de la provincia de Santa Fe. El transporte se realiza en camión, y se adoptó una distancia de transporte de 170 km. La arena de trituración presenta un tamaño de partículas mayor que la arena de río y procede de canteras situadas en Olavarría y se adoptaron los mismos medios de transporte para los agregados gruesos. El menor tamaño de partículas de la arena de río completa la curva granulométrica de la arena de trituración.

Para el mezclado del hormigón y el lavado de los camiones motohormigoneros se utiliza agua de red y agua de lluvia. El agua de lavado se recicla en su totalidad para su uso posterior como agua de lavado/mezclado. Se calcula que en la planta de hormigón premezclado se utilizan 0,343 m³ de agua por cada m³ de hormigón. En cuanto al agua de mezclado, se necesitan 0,143 m³ por m³ de hormigón producido y 0,200 m³ de agua

por m³ de hormigón para lavar los camiones [47]. Aproximadamente el 15,8 % del agua se recoge de la lluvia.

Se utilizan diferentes aditivos químicos, como reductores de agua, superplastificantes y aditivos retenedores de asentamiento, entre otros.

Se estimó el uso de 1,90 MWh/m³ de hormigón y 3,16 l de gasoil/m³ de hormigón. Asimismo, se estimó la carga media del camión motohormigonero en 7,6 m³ y la distancia media de transporte en 11,27 km. Esto representa, en promedio, 342.745 traslados desde la planta de hormigón elaborado hasta el sitio de colocación y 3.861.595 km recorridos por los camiones en 2019.

Los productores de hormigón elaborado clasifican los residuos en similares a los domésticos, peligrosos (incluidos los trapos contaminados con combustible y aceite) y RCD. Ellos mismos reciclan los RCD, y los organismos pertinentes recogen los residuos domésticos y peligrosos de las plantas.

3.2. Análisis del flujo de materiales del hormigón elaborado en RMBA

La Fig. 3 muestra el AFM del hormigón elaborado producido en RMBA en 2019. La producción de 2.604.862 m³ de hormigón elaborado requirió de 6.664.434 ± 583.645 t de hormigón y 7.156.871 ± 595.383 t de materias primas y materias primas secundarias. De estas ~7 Mt, 6.818.281 ± 529.637 t (~95,3 %) son minerales, y 410.912 ± 65.746 t (~4,7 %) son de agua. Por su parte, el ~78,6 % de los minerales corresponde a la producción o extracción de agregados, y el ~21,4 % a la producción de cemento y SCM. En la planta de hormigón elaborado se generaron 52.317 ± 23.990 t de RCD y se almacenaron 46.276 ± 88.139 t de agua de lavado para su reciclado y posterior reutilización.

La producción de 944.861 ± 109.368 t de los distintos tipos de cemento requirió 1.338.705 ± 291.519 t de materias primas y materias primas secundarias. Durante la producción de cemento se liberan 393.844 ± 68.624 t de CO₂ debido a la descomposición de la piedra caliza (CaCO₃) en CaO y CO₂ durante la clinkerización [45].

En 2019, la producción de hormigón elaborado requirió utilizar 2.816.946 ± 233.648 t de agregado grueso y 166.759 ± 13.832 t de arena de trituración. Las fracciones de piedra que son utilizadas por otras industrias [48] o se acumulan en las canteras como residuos se omitieron en el AFM y proporcionaron un valor menor del uso de materia prima. Según las estimaciones de producción de canteras locales, se extrae 1,35 t de piedra para producir 1 t de agregado grueso. Por lo tanto, se necesitarían 3.802.877 ± 315.438 t de materias primas para el agregado grueso, lo que supone una diferencia de aproximadamente 1 Mt entre el uso de materias primas calculado en STAN (2.983.705 ± 247.490 t) con el modelo simplificado y la estimación teórica.

Por otro lado, el 99,3 % son materias primas y sólo el 0,7 % de las entradas son materias primas secundarias. El 41,7 % de las materias primas corresponden a la producción de agregados de trituración, y el 33,2 % a arena de río. El uso de agregados gruesos reciclados surge como una alternativa prometedora en la RMBA. Luego de la normalización, su uso ha crecido y se estima que en 2019 los agregados reciclados representaron el 6,3 % del total de agregados gruesos. La norma IRAM 1531:2016 permite reemplazar hasta un 20 % del agregado natural por agregado reciclado, por lo que se proyecta un aumento en el reemplazo a futuro. Consecuentemente, sería posible reducir el consumo de materias primas sustituyendo los agregados gruesos de trituración por agregados gruesos reciclados procedentes de los RCD.

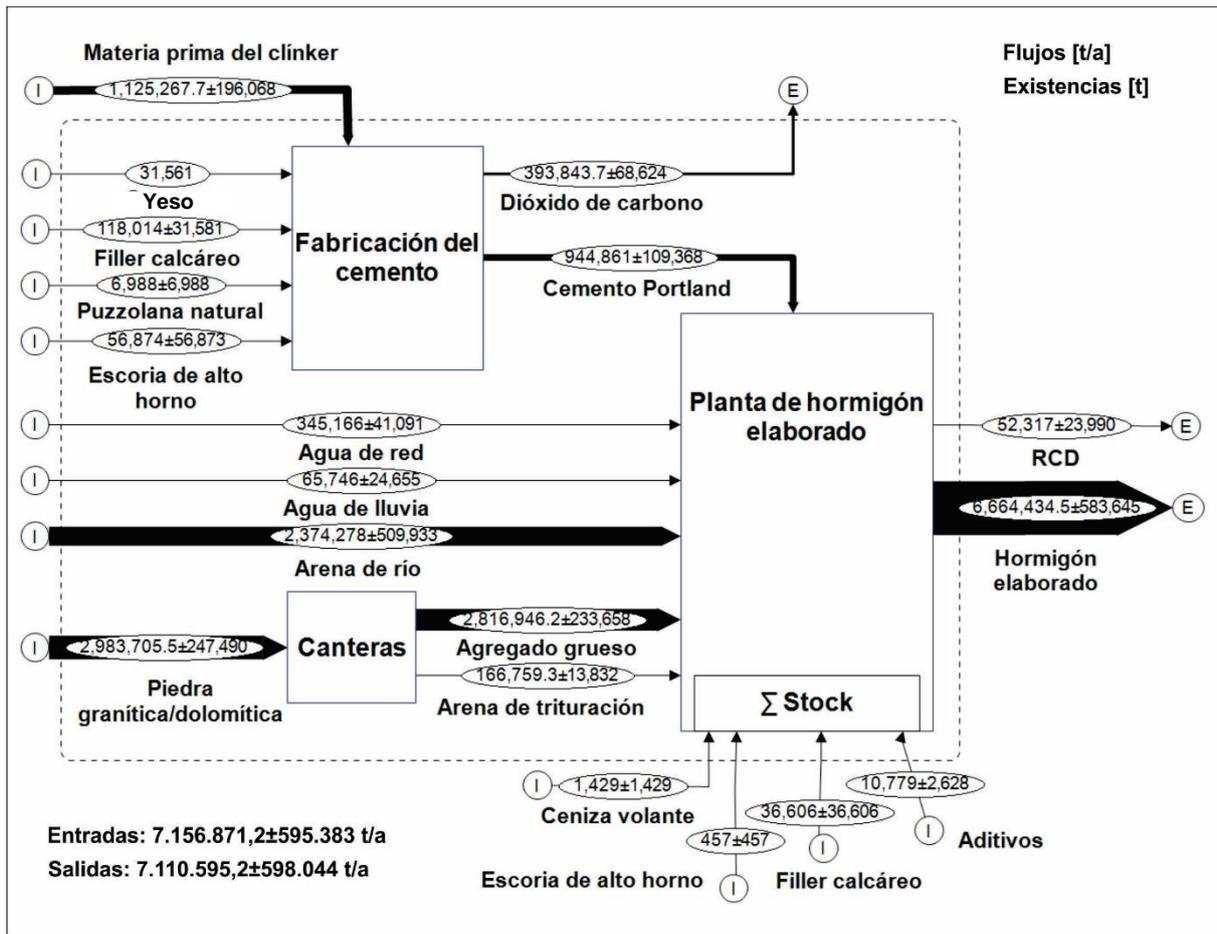


Figura 3. Análisis de flujo de materiales del hormigón elaborado en la RMBA.

El reemplazo del 20 % de agregados gruesos naturales por agregados gruesos reciclados permitiría reducir de 99,3 % a 91,3 % el uso de materia prima para la producción de hormigón elaborado.

Además, para la producción de los diferentes tipos de cementos, ~95,8 % de los materiales corresponden a materias primas y ~4,2 % a materias primas secundarias. Como alternativa para aumentar la circularidad de la economía de la industria de la construcción, es posible incorporar RCD de origen cerámico como reemplazo del cemento Portland. Se ha demostrado que el reemplazo de hasta 25 % de cemento Portland normal (CPN) por residuos cerámicos molidos y vidrio molido permite obtener un hormigón de prestaciones equivalentes al hormigón de CPN, sin

compromiso de la resistencia mecánica y la durabilidad [49,50].

3.3. Análisis de ciclo de vida del hormigón elaborado en la RMBA

La Fig. 4 muestra las entradas y salidas del sistema correspondientes al ICV. El transporte de materiales es significativo en el inventario del ciclo de vida de la RMBA debido a la gran cantidad de materiales por transportar y a las largas distancias de transporte desde el lugar de extracción/producción hasta la planta de hormigón elaborado.

Debido a la limitada información sobre los materiales y el proceso de fabricación de los aditivos químicos con la que cuentan los

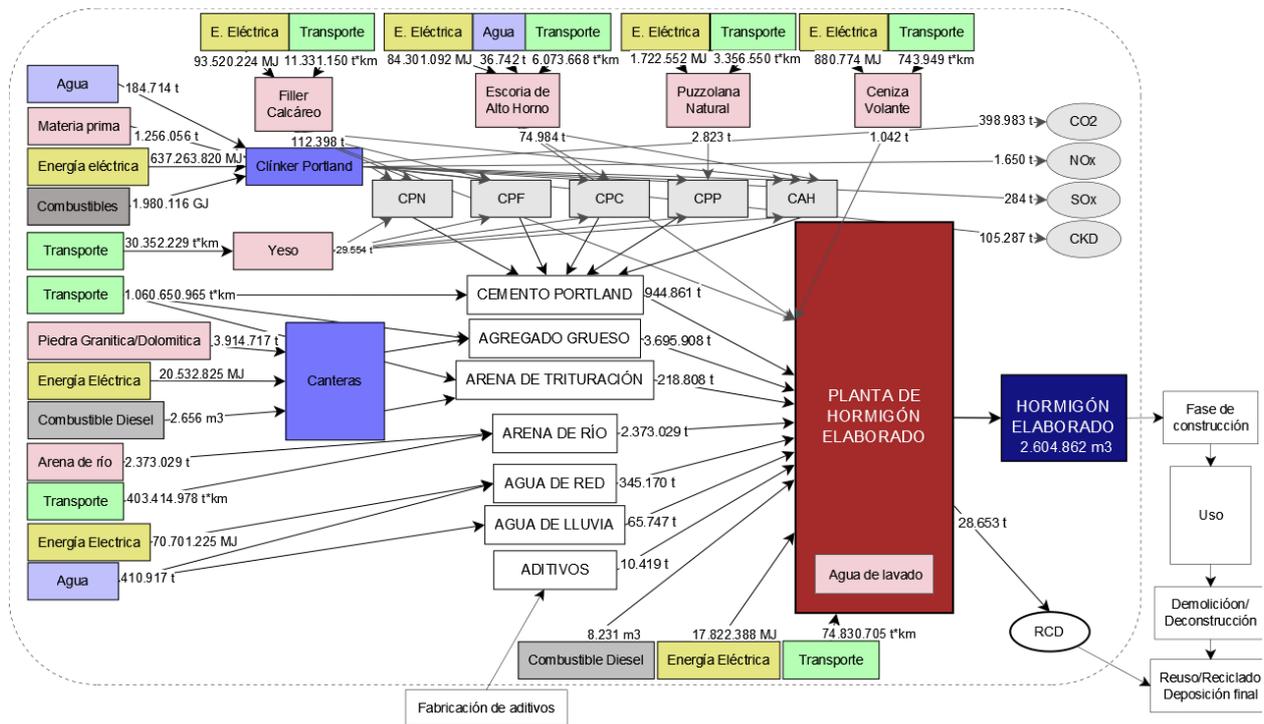


Figura 4. Inventario de ciclo de vida del hormigón elaborado.

autores a la fecha de publicación de este trabajo, sólo se consideran como un material componente del hormigón. Tampoco se tuvo en cuenta el transporte desde el lugar de adquisición hasta la planta de hormigón elaborado.

La Tabla 2 muestra las emisiones de CO₂ equivalente y el uso de materia prima y energía del hormigón elaborado producido en la RMBA en 2019.

El 79,1 % de las emisiones de CO₂ equivalente se asocian a la producción de cemento Portland y SCM. A su vez, el 54,8 % de las emisiones del cemento y los SCM corresponde a la liberación de CO₂ procedente de la descomposición de la piedra caliza, el 35,4 % a la combustión de combustibles fósiles en el horno de clinker, el 5,3 % al uso de electricidad y el 4,5 % al transporte del material. El 17,5 % de las emisiones corresponden a la producción/extracción de los agregados y su transporte. Para los agregados de trituración, el 96,4 % de las emisiones se deben al

transporte desde la cantera hasta la RMBA y sólo el 3,6 % a las operaciones de extracción, trituración y transporte dentro de la planta. En el caso de la arena de río, menos del 1 % corresponde a las operaciones de extracción, siendo el transporte el que más contribuye a las emisiones de CO₂ equivalentes. Las restantes están relacionadas con la producción de aditivos (1,9 %), la mezcla de hormigón y el transporte desde la planta de hormigón elaborado hasta el lugar de colocación (1,1 %) y al tratamiento del agua (0,4 %).

La producción de materiales componentes del hormigón y el mezclado y transporte de 2.604.862 m³ de hormigón elaborado consumieron 4.156.815 GJ de energía. El 94,6 % de la energía utilizada corresponde a la producción de cemento Portland y SCM, el 2,9 % a la producción de agregados, el 2,2 % al tratamiento del agua y el 0,4 % a la mezcla de hormigón y el transporte desde la planta de hormigón hasta el lugar de colocación. De la energía consumida en la producción de cemento Portland, el 29,2 % corresponde a la

Tabla 2. Impactos del hormigón elaborado producido en la RMBA en 2019.

	Emisiones de CO ₂ equivalente (t)	Uso de energía (GJ)	Uso de materia prima (Mt)
Mezclado del hormigón	10.543	17.822	-
Aditivos	17.400	-	0,01
Agua	3.720	89.637	0,52
Agregado de trituración	110.027	115.762	3,91
Arena natural	50.762	2.819	2,37
Materiales cementíceos (cemento + SCM)	727.505	3.930.774	1,67
TOTAL	919.957	4.156.815	8,49

energía eléctrica y el 70,8 % a los combustibles usados en el horno, que es el proceso de mayor intensidad energética debido a la elevada temperatura de clinkerización.

Por otro lado, para producir los 2.604.862 m³ de hormigón se necesitaron 8,49 Mt de materias primas. El 74,1 % de los materiales corresponden a la producción/extracción de agregados (46,1 % a agregados de trituración y 28,0 % a arena de río), y el 19,7 % a la producción de cemento Portland y SCM. El uso de materias primas para la producción de agregados es predominante, ya que es el material que representa la mayor proporción másica del hormigón [25,26]. Además, producir 962.340 t de material cementante requirió extraer 1.400.831 t de materias primas. La evaluación de esta categoría de impacto indica que la estimación del uso de materias primas creado en el método personalizado en OpenLCA arroja valores similares a los estimados en el AFM, por lo que en los posteriores análisis de este trabajo sólo se realizará el análisis de ciclo de vida, considerando las categorías de impacto de emisiones de CO₂ equivalente y uso de energía y materia prima, utilizando el método desarrollado por los autores.

4. Discusión

La situación climática global y la permanente demanda de materiales de construcción exige a los actores intervinientes en los diferentes procesos de producción, construcción y mantenimiento de estructuras profundizar la aplicación de diferentes estrategias que permitan reducir los impactos ambientales asociados. A la fecha, se han aplicado distintas medidas que han reducido principalmente las emisiones de CO₂ equivalentes, pero para alcanzar un hormigón de emisión neta cero es necesario estudiar otras alternativas, que involucren aumentar la vida útil y reducir el volumen de materiales y energía involucrados.

Como han demostrado varios autores [7,14,16,51,52] y también en este trabajo, la producción de clinker Portland es la que más contribuye al uso de energía y a las emisiones de GEI del hormigón. En este sentido, el margen de maniobra de la industria cementera para reducir las emisiones de CO₂ equivalente es limitado debido a la naturaleza del proceso de clinkerización, por lo que el reemplazo parcial del clinker Portland por SCM es una de las estrategias más extendidas [16].

Sin embargo, el uso de SCM puede reducir la resistencia mecánica y afectar a la durabilidad del hormigón [34]. A su vez, una menor resistencia mecánica aumenta el volumen de hormigón necesario para soportar la misma carga y puede generar un mayor impacto ambiental [22,53]. Por otro lado, la reducción de la vida útil conlleva un mayor uso de materiales para el mantenimiento y la reparación de las estructuras, así como a una mayor tasa de renovación de las mismas, lo que también aumenta el impacto ambiental [16,54]. En consecuencia, el uso de SCM debe analizarse con un criterio integral ya que limitarse a reducir las emisiones de CO₂ equivalente por tonelada de material podría aumentar el impacto ambiental en fases posteriores del ciclo de vida de la estructura.

La incorporación de agregados reciclados reduce el impacto ambiental, ya que disminuye las emisiones de CO₂ equivalente y el consumo de materias primas. En la RMBA, la reducción de las emisiones de CO₂ equivalente se debe a la disminución significativa de la distancia de transporte, que representa más del 95 % de las emisiones asociadas a estos materiales. Además, reduce la utilización de materias primas por el reemplazo del material que ocupa el mayor volumen del hormigón. Se ha demostrado que es posible obtener hormigón H30/35 (la clase resistente mayoritariamente comercializada en el MRBA) utilizando hasta un 20 % de agregados reciclados, sin afectar a las propiedades en estado fresco ni a la durabilidad [55,56]. Sin embargo, más allá de los límites establecidos por la normativa argentina, es posible incluso reemplazar 75 % del agregado grueso natural por agregado reciclado sin comprometer la resistencia mecánica ni la durabilidad del hormigón [57]. Sin embargo, se debe garantizar un adecuado diseño de mezcla para mantener las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón sin aumentar el consumo de cemento por m³, ya que podría contrarrestarse el efecto positivo del uso de materias primas secundarias con el mayor

uso de un material con elevada emisión de CO₂ equivalente por tonelada y de uso intensivo de energía para su producción.

Los RCD de diferentes ciudades de Argentina están compuestos principalmente por materiales cerámicos [58–60]. En un estudio realizado por los autores [61], sería posible obtener entre 80 y 100 mil toneladas anuales de residuos cerámicos para ser utilizados como SCM en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Por lo tanto, la RMBA podría proporcionar una SCM artificial a partir de la cantera urbana, reduciendo las emisiones de CO₂ equivalente del hormigón y disminuyendo el impacto del transporte sobre una porción del cemento Portland consumido.

En la Fig. 5 se presentan los resultados del ACV para 1 m³ de hormigón, en las tres categorías de impacto estudiadas, considerando cuatro escenarios posibles:

- 1- La situación actual (BAU).
- 2- El reemplazo parcial de 20 % del agregado grueso natural por agregado reciclado (AR20).
- 3- El reemplazo parcial de 75 % del agregado grueso natural por agregado reciclado (AR75).
- 4- El reemplazo parcial de 75 % del agregado grueso natural por agregado reciclado y sumando la formulación de un cemento mezcla con 25 % de reemplazo de CPN por residuo cerámico molido, que reemplazaría al 50 % del CPN comercializado en la RMBA (RCM25).

En la Fig. 5 se observa que las emisiones de CO₂ equivalente y el uso de energía están íntimamente relacionados (Figs. 5a y 5b), siendo la producción y transporte del cemento Portland y los SCM los principales responsables, ya que la producción de clínker es el proceso que consume la mayor cantidad de energía. En cuanto al uso de materia prima, los agregados son los mayores responsables del uso de materia prima en cualquier escenario de los planteados.

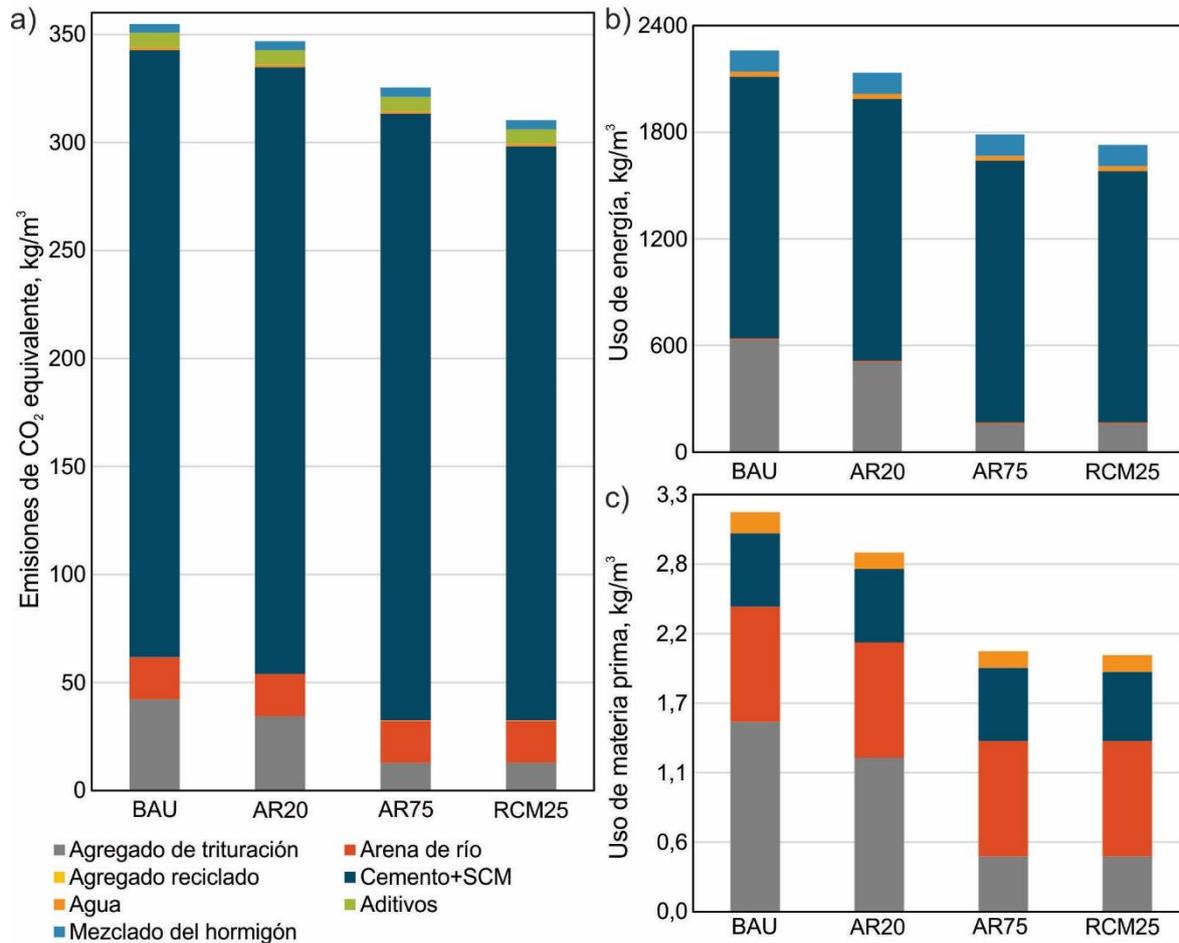


Figura 5. Resultados del ACV de 1 m³ de hormigón, en los escenarios BAU, AR20, AR75 y RCM25.

El reemplazo del 20 % de los agregados gruesos de trituración por agregados gruesos reciclados (AR20) reduce sólo el 2,2 % de las emisiones de CO₂ equivalente (Fig. 5a), a pesar de la reducción significativa de la distancia de transporte. Sin embargo, el impacto más significativo se produce en el uso de materia prima, que sería aproximadamente un 10,1 % menor que en la situación BAU (Fig. 5c). Si el reemplazo de agregado grueso de trituración por agregado reciclado se aumentara a 75 %, las emisiones sólo se reducen un 8,3 % respecto de BAU, pero el uso de recursos naturales se reduce un 34,8 %. Si además se incorporaran residuos cerámicos y se reemplazara el 50 % del CPN por un cemento mezcla con residuos cerámicos molidos (RCM25), se conseguiría una reducción adicional del 4,3 % de las

emisiones de CO₂ equivalente por m³ de hormigón (Fig. 5a), ya que se reducirían simultáneamente las emisiones derivadas de la producción de cemento y del transporte del CPN a la RMBA y un 1,0 % adicional del uso de materia prima (Fig. 5c).

Se observa que en el escenario BAU la suma de los agregados naturales (agregados de trituración y arena de río) representa 75,4 % de la materia prima involucrada, mientras que en el escenario AR75, los agregados representan el 65,5 %, de los cuales 67,5 % de esa fracción corresponden a arena de río. En las últimas décadas se ha realizado un gran esfuerzo por encontrar reemplazos de la arena de río debido a la escasez en ciertas regiones, que pueden limitar la producción de hormigón [27,62]. De acuerdo con

investigaciones realizadas en Argentina, sería posible reemplazar hasta un 30 % de la arena natural por arena proveniente de los RCD sin comprometer las prestaciones del hormigón [55,63]. Sin embargo, la normativa vigente en el país no permite la utilización de este tipo de agregados [64].

Esto demuestra que, para avanzar hacia escenarios de hormigones de impacto ambiental reducido, se requiere de la acción coordinada de diferentes actores, que involucran desde los ingenieros y técnicos que diseñan las mezclas de hormigón hasta los organismos que regulan y limitan los materiales que se pueden utilizar como sus componentes. Pero, además de las normas técnicas que permitan la incorporación de materiales provenientes de los RCD, se requieren políticas que promuevan estas prácticas y que incentiven a la investigación y búsqueda de nuevas oportunidades para la industria.

4.1. Límites del estudio

El presente estudio examina el hormigón elaborado únicamente desde el punto de vista de su composición, pero no se evalúan los efectos de los ajustes de las características tecnológicas. Además, el estudio excluye las etapas posteriores a la llegada del camión motohormigonero a la obra (colocación, utilización, mantenimiento, desmantelamiento/demolición), por lo que no se evalúan la trabajabilidad (facilidad de colocación), el acabado, la durabilidad, las propiedades térmicas y otras propiedades del hormigón.

4.2. Futuras investigaciones

En futuros estudios, se espera realizar una evaluación integral del hormigón como material de construcción, incluyendo un espectro más amplio de participantes en la toma de decisiones. El diseño y la optimización de la cadena de suministro de las plantas de hormigón elaborado es

deseable para reducir los costos económicos y los impactos ambientales asociados con el transporte del material, y es una metodología aún no aplicada a la industria de la construcción en nuestro país. Se perseguirá como objetivo principal obtener hormigones de alta resistencia y durables con el menor impacto ambiental, siendo un avance importante para alcanzar los objetivos del Hormigón Neto Cero para el año 2050.

Además, se incluirá el consumo de agua en los diferentes procesos para estudiarla como una categoría de impacto relevante e identificar puntos críticos del sistema, en particular en las zonas que experimentan estrés hídrico.

Finalmente, sería conveniente probar esta metodología en otras regiones del país para realizar ajustes en las mediciones y en el reconocimiento de las categorías relevantes a estudiarse.

5. Conclusiones

La metodología propuesta para este trabajo demostró ser una herramienta útil para cuantificar el impacto ambiental del hormigón elaborado para una región determinada, contribuyendo a la profundización del conocimiento actual de la industria de la construcción.

Los resultados muestran que, para la producción de 2.604.862 m³ de hormigón elaborado en la Región Metropolitana de Buenos Aires en 2019, se requirieron 7,16 Mt de materiales. El 99,1 % correspondió a materias primas, mientras que el 0,9 % a materias primas secundarias. 5,36 Mt (~78,6 %) de los materiales extraídos pertenecen a la producción de agregados, ya que revisten el mayor volumen de hormigón. Sin embargo, representan menos del 19,5 % de las emisiones de CO₂ equivalente de la producción de hormigón elaborado y su mayor parte (~96,4 %) se debe al transporte desde las canteras hasta las plantas de hormigón elaborado. La producción de

agregados en sí tiene asociada una baja emisión de CO₂ equivalente, ya que se utiliza principalmente energía eléctrica durante la trituración y la clasificación, y Argentina tiene una matriz energética relativamente limpia.

El cemento Portland es el material que más contribuye a las emisiones de CO₂ equivalente, atribuible a la liberación de CO₂ durante la descomposición de la piedra caliza y al consumo de energía para alcanzar la temperatura de clinkerización en el horno de clinker.

Dentro de las posibles estrategias para las que se midieron los impactos potenciales en la evaluación del ciclo de vida, el uso de agregados reciclados es el enfoque que más contribuye a la reducción del uso de materias primas. Además, si la producción de agregados reciclados se realiza cerca de la obra o de la planta de hormigón elaborado, reduciría también las emisiones de CO₂ equivalente.

Por último, la industria de la construcción ya ha introducido varias iniciativas que mitigan el impacto medioambiental de la producción de materiales y la construcción de viviendas e infraestructura. Sin embargo, para alcanzar el objetivo del Hormigón Neto Cero en 2050, es necesario consolidar diversas acciones para impulsar la eficiencia de los materiales, desmaterializar la industria de la construcción y reducir las emisiones de CO₂ equivalente. Esto requiere un compromiso más amplio de las partes interesadas, no sólo de los productores de cemento y hormigón, y la realización de nuevos estudios como el análisis integral del ciclo de vida y la optimización de la cadena de suministro.

Referencias

- [1] Bárcena, A., Samaniego, J., Galindo, L. M., Ferrer, J., Alatorre, J. E., Stockins, P., Reyes, O., Sanchez, L., y Mostacedo, J. (2018). *Economics of climate change in Latin America and the Caribbean. A graphic View*. ECLAC. United Nations.
- [2] Irassar, E. F., John, V. M., Tobón, J. I., García Punhagui, K. R., y Mack-Vergara, Y. (2020). Ciudades sostenibles y resilientes. *Revista Cemento & Concreto*, 7, 78–90.
- [3] Organisation for Economic Co-operation and Development. (2019). *Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental Consequences*. <https://doi.org/gqs2wj>
- [4] Adams, M., Burrows, V., y Richardson, S. (2019). *Bringing embodied carbon upfront. Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon*. World Green Building Council.
- [5] Cancio Díaz, Y., Sánchez Berriel, S., Heierli, U., Favier, A. R., Sánchez Machado, I. R., Scrivener, K. L., Martirena Hernández, J. F., y Habert, G. (2017). Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies. *Development Engineering*, 2, 82–91. <https://doi.org/gfjpinh>
- [6] Organisation for Economic Co-operation and Development. (2020). *Environment at a glance. In Environment at a Glance Indicators*. <https://doi.org/khsb>
- [7] Saadé, M., Erradhouani, B., Pawlak, S., Appendino, F., Peupartier, B., y Roux, C. (2022). Combining circular and LCA indicators for the early design of urban projects. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27, 1–19. <https://doi.org/khsc>
- [8] Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 601–605. <https://doi.org/cg28h2>
- [9] Reis, D. C., Mack-Vergara, Y., y John, V. M. (2019). Material flow analysis and material use efficiency of Brazil's mortar and concrete supply chain. *Journal of Industrial Ecology*, 23(6), 1396–1409. <https://doi.org/khsd>
- [10] British Standards Institution. (2016). *ISO 14044:2006+A1. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*.
- [11] Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., y Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21. <https://doi.org/bsm9wk>

- [12] Hellweg, S., y Canals, L. M. I. (2014). Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science*, 344(6188), 1109–1113. <https://doi.org/gf7c54>
- [13] Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., y Horvath, A. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, 114, 115–124. <https://doi.org/ggfzp8>
- [14] Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., y Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 559–573. <https://doi.org/ghpcgn>
- [15] UN Environment, Scrivener, K. L., John, V. M., y Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/dbmc>
- [16] Miller, S. A., Habert, G., Myers, R. J., y Harvey, J. T. (2021). Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies. *One Earth*, 4(10), 1398–1411. <https://doi.org/gn84nx>
- [17] Reis, D. C., Quattrone, M., Souza, J. F. T., Punhagui, K. R. G., Pacca, S. A., y John, V. M. (2021). Potential CO₂ reduction and uptake due to industrialization and efficient cement use in Brazil by 2050. *Journal of Industrial Ecology*, 25(2), 344–358. <https://doi.org/gkptvr>
- [18] Miller, S. A., Monteiro, P. J. M., Ostertag, C. P., y Horvath, A. (2016). Concrete mixture proportioning for desired strength and reduced global warming potential. *Construction and Building Materials*, 128, 410–421. <https://doi.org/khsg>
- [19] Kurda, R., Silvestre, J. D., y de Brito, J. (2018). Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 139, 407–417. <https://doi.org/gfjvmc>
- [20] Kurda, R., de Brito, J., y Silvestre, J. D. (2020). A comparative study of the mechanical and life cycle assessment of high-content fly ash and recycled aggregates concrete. *Journal of Building Engineering*, 29, 101173. <https://doi.org/khsh>
- [21] Reis, D. C., Abrão, P. C. R. A., Sui, T., y John, V. M. (2020). Influence of cement strength class on environmental impact of concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 163, 105075. <https://doi.org/khsj>
- [22] Cordoba, G., y Irassar, E. F. (2023). Carbon footprint of reinforced concrete columns with and without supplementary cementitious materials. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28, 800–812. <https://doi.org/khsk>
- [23] Miller, S. A., Horvath, A., Monteiro, P. J. M., y Ostertag, C. P. (2015). Greenhouse gas emissions from concrete can be reduced by using mix proportions, geometric aspects, and age as design factors. *Environmental Research Letters*, 10, 114017. <https://doi.org/gh3rpn>
- [24] Hawkins, W., Orr, J., Ibell, T., y Shepherd, P. (2020). A design methodology to reduce the embodied carbon of concrete buildings using thin-shell floors. *Engineering Structures*, 207, 110195. <https://doi.org/khsm>
- [25] Habert, G., Bouzidi, Y., Chen, C., y Jullien, A. (2010). Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(6), 364–376. <https://doi.org/bsk233>
- [26] Silva, F. B., Reis, D. C., Mack-Vergara, Y. L., Pessoto, L., Feng, H., Pacca, S. A., Lasvaux, S., Habert, G., y John, V. M. (2020). Primary data priorities for the life cycle inventory of construction products: focus on foreground processes. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 980–997. <https://doi.org/khsp>
- [27] United Nations Environment Programme. (2019). *Sand and Sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/28163>
- [28] Wiedenhofer, D., Steinberger, J. K., Eisenmenger, N., & Haas, W. (2015). Maintenance and expansion: modeling material stocks and flows for residential buildings and transportation networks in the EU25. *Journal of Industrial Ecology*, 19(4), 538–551. <https://doi.org/f3ssgr>
- [29] Condeixa, K., Haddad, A., y Boer, D. (2017). Material flow analysis of the residential building stock at the city of Rio de Janeiro. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1249–1267. <https://doi.org/gbk5h7>

- [30] Meglin, R., Kytzia, S., y Habert, G. (2022). Regional circular economy of building materials: Environmental and economic assessment combining Material Flow Analysis, Input-Output Analyses, and Life Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 26(2), 562–576. <https://doi.org/gm8pqq>
- [31] Meglin, R., Kytzia, S., y Habert, G. (2022). Uncertainty, variability, price changes and their implications on a regional building materials industry: The case of Swiss canton Argovia. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129944. <https://doi.org/khsq>
- [32] Göswein, V., Silvestre, J. D., Sousa Monteiro, C., Habert, G., Freire, F., y Pittau, F. (2021). Influence of material choice, renovation rate, and electricity grid to achieve a Paris Agreement-compatible building stock: A Portuguese case study. *Building and Environment*, 195, 107773. <https://doi.org/grv3tb>
- [33] Habert, G., Billard, C., Rossi, P., Chen, C., y Roussel, N. (2010). Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. *Cement and Concrete Research*, 40(5), 820–826. <https://doi.org/drwd7s>
- [34] de Brito, J., y Kurda, R. (2021). The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials. *Journal of Cleaner Production*, 281, 123558. <https://doi.org/gn9xkb>
- [35] Global Cement and Concrete Association. (2021). *Concrete Future. The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete*. <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap.pdf>
- [36] Goytia, C., y Cristini, M. (2017). *Diagnóstico sobre ciudades y desarrollo urbano - Argentina 2030*. Jefatura de Gabinete de Ministros. Presidencia de la Nación. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/doc_diagnostico_ciudades_2030_1.pdf
- [37] Bruera, I. (2016). *Competitividad sistémica para la Región Metropolitana de Buenos Aires*. Informe Digital Metropolitano. Fundación Metropolitana. <https://metropolitana.org.ar/idm/competitividad-sistemica-para-la-region-metropolitana-de-buenos-aires/>
- [38] AMBA Data. (2022). *AMBA en el mundo*. Buenos Aires Ciudad. Buenos Aires Provincia. <https://www.ambadata.gob.ar/amba-en-el-mundo>
- [39] Asociación Argentina del Hormigón Elaborado. (2019). *Producción anual & producción por regiones 2015-2019*. <https://hormigonelaborado.com/wp-content/uploads/2020/06/Producción-2019.pdf>
- [40] Cencic, O., y Rechberger, H. (2008). Material Flow Analysis with Software STAN. En M. Andreas, P. Bernd, y S. Martin (Eds.), *Environmental Informatics and Industrial Ecology* (pp. 440–447). Shaker Verlag. http://enviroinfo.eu/sites/default/files/pdfs/vol1_19/0440.pdf
- [41] Brunner, P. H., y Rechberger, H. (2017). *Handbook of material flow analysis. For Environmental, Resource, and Waste Engineers* (2da ed.). Taylor & Francis Group.
- [42] Jones, C. (2019). *Inventory of Carbon and Energy (ICE) Database*. Circular Ecology. <https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html>
- [43] Kourehpaz, P., y Miller, S. A. (2019). Eco-efficient design indices for reinforced concrete members. *Materials and Structures*, 52, 96. <https://doi.org/gr75p9>
- [44] Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M. M. B., Miller, H. L. J., y Chen Z. (Eds.). (2007) *Climate Change 2007. The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf
- [45] Flower, D. J. M., y Sanjayan, J. G. (2007). Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12, 282–288. <https://doi.org/bg437n>
- [46] Presa, C. (2016). *Consumo energético del ciclo integral del agua en usos urbanos*. <https://ecodes.org/archivo/proyectos/archivo-ecodes/pages/especial/consumo-energetico-ciclo-integral-agua-usos-urbanos/index.html> (acceso abril 2016).

- [47] Botton, J., Stankiewicz, L. L., Gheller, R., Mello, J. M. M. de, Dalconton, F., y Onofre, S. B. (2018). Reuse of the Concrete Mixer Truck Wash Water in the Production of Concrete - A Clean Production Proposal. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 5(3), 4–10. <https://doi.org/khsv>
- [48] Passaretti, M. G., Ninago, M. D., Paulo, C. I., Petit, H. A., Irassar, E. F., Vega, D. A., Villar, M. A., y López, O. V. (2019). Biocomposites based on thermoplastic starch and granite sand quarry waste. *Journal of Renewable Materials*, 7(4), 393–402. <https://doi.org/khsw>
- [49] Zito, S. V., Irassar, E. F., y Rahhal, V. F. (2020). Management of sanitary ware wastes as supplementary cementing materials in concretes. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 9(1), 35–49. <https://doi.org/khsx>
- [50] Zito, S. V., Cordoba, G. P., Irassar, E. F., y Rahhal, V. F. (2023). Durability of eco-friendly blended cements incorporating ceramic waste from different sources. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12(1), 13–23. <https://doi.org/khsz>
- [51] Bajželj, B., Allwood, J. M., y Cullen, J. M. (2013). Designing climate change mitigation plans that add up. *Environmental Science and Technology*, 47(14), 8062–8069. <https://doi.org/f468sz>
- [52] Barcelo, L., Kline, J., Walenta, G., y Gartner, E. M. (2014). Cement and carbon emissions. *Materials and Structures*, 47, 1055–1065. <https://doi.org/gq6p89>
- [53] The Concrete Centre. (2020). *Specifying Sustainable Concrete. Understanding the role of constituent materials*. MPA The Concrete Centre. <https://www.concretecentre.com/Publications-Software/Publications/Specifying-Sustainable-Concrete.aspx>
- [54] The Concrete Centre. (2018). *Material Efficiency: Design guidance for doing more with less, using concrete and masonry*. MPA The Concrete Centre. <https://www.concretecentre.com/Resources/Publications/Material-Efficiency.aspx>
- [55] Zega, C. J., y Di Maio, A. A. (2011). Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Management*, 31(11), 2336–2340. <https://doi.org/fh3qxt>
- [56] Zega, C. J., y Di Maio, A. A. (2011). Recycled Concretes Made with Waste Ready-Mix Concrete as Coarse Aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(3), 281–286. <https://doi.org/b6jdc7>
- [57] Zega, C. J., Taus, V. L., y Di Maio, A. A. (2006). Comportamiento físico-mecánico de hormigones reciclados elaborados con canto rodado. *Boletín Técnico IMME*, 44(3), 17–26. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2006000300003
- [58] Mercante, I. T., Martinengo, P. D., Llamas, S., Rojo, J., y Poncio, F. (2010). Aspectos ambientales de obras civiles de edificación. Gestión de residuos de construcción. En *III Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*.
- [59] Moro, J. M., Meneses, R., y Ortega, N.F. (2014). Demolished concrete recycling possibilities in the city of Bahía Blanca, Argentina. En G. Cerminara (Ed.), *A Glance at the World. Waste Management*, 34(2), 564–565. <https://doi.org/khs4>
- [60] Tufaro, M. F. (2012). *Residuos de la Construcción. Argentina Ambiental*. https://argentinambiental.com/wp-content/uploads/pdf/AA95-36-Residuos_de_la_Construccion.pdf
- [61] Cordoba, G., Aroca, N., y Lemma, R. (2013). [D]moler. A. V. Bologna (Ed.), *Concurso Odebrecht para el Desarrollo Sustentable*. Odebrecht.
- [62] Ulsen, C., Antoniassi, J. L., Martins, I. M., y Kahn, H. (2021). High quality recycled sand from mixed CDW - Is that possible?. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 29–42. <https://doi.org/gmx9d7>
- [63] Zega, C. J., Sosa, M. E., y Di Maio, A. A. (2018). Agregados reciclados de hormigón. Comportamiento mecánico del hormigón reciclado. *Ciencia y Tecnología de Los Materiales*, 8, 39–49. <https://host170.sedici.unlp.edu.ar/server/api/content/bitstreams/85f4b102-b328-4726-bc82-75336e4b696d/content>
- [64] Sosa, M. E., Zega, C. J., y Carrizo, L. (2021). Uso de residuos de construcción y demolición en hormigón. *Revista Hormigonar Digital*, 2, 24–28. https://issuu.com/revistahormigonar/docs/v2_hormigonar_digital_2