



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

Centro de Políticas Públicas UC

Nuevos áridos para la construcción: hacia una economía circular para una industria más sustentable y una infraestructura más resiliente

IVÁN NAVARRETE

Escuela de Ingeniería UC y Centro UC Innovación del Hormigón

FELIPE VARGAS

Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Austral de Chile



TEMAS DE LA AGENDA PÚBLICA

Año 19 / N° 171 / Junio 2024

ISSN 0718-9745

Nuevos áridos para la construcción: hacia una economía circular para una industria más sustentable y una infraestructura más resiliente

IVÁN NAVARRETE

Escuela de Ingeniería UC y Centro UC Innovación del Hormigón

FELIPE VARGAS

Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Austral de Chile

1. Introducción

En los últimos años, la preocupación por la sustentabilidad de la industria de la construcción ha crecido significativamente. Esto abarca desde el consumo y la eficiencia energética de las edificaciones, hasta la forma en que los proyectos afectan social y culturalmente a las comunidades cercanas. Dentro de lo último, un aspecto relevante es el impacto que generan los materiales usados en la industria. Por su volumen y relevancia, los áridos, también conocidos como agregados, cobran protagonismo.

Se define como árido al material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaño estable (INN, 2013), que sirve para ser usado como material de relleno y que otorga rigidez. Como se aprecia, esta es una propiedad fundamental en cualquier estructura ingenieril. Como tal –y al ser uno de los materiales más utilizados en el desarrollo de la humanidad– se generan impactos relevantes por su extracción, con serias consecuencias en diversas partes del mundo (Chi Yin y Beiser, 2018), incluyendo Chile, como han hecho notar organizaciones civiles (Montes, 2023), prensa (Eckholt, 2024) y académicos (Arróspide, Mao y Escauriaza, 2018).

Con un consumo estimado en 57.000.000 m³ anuales, Chile debe buscar y armonizar las necesidades de infraestructura de un país que se está desarrollando, con un proceso armonioso de uso, extracción, producción y control del mercado de los áridos, que permita y facilite su uso. También es necesario asegurar la sostenibilidad de este material de construcción que seguiremos utili-

zando y que requerirán las generaciones futuras. En el siguiente documento se busca dar una mirada crítica al mercado de los áridos, planteando cómo su producción y uso afectan la sustentabilidad, y los posibles caminos para mejorar este aspecto, de manera de aportar a la discusión sobre la regulación y control de la industria de los áridos en Chile. De esta forma, el artículo se divide en dos secciones principales. En la primera de ellas se analiza la situación actual de la industria de los áridos naturales en Chile y en la segunda se discuten las principales oportunidades de cambio y se proponen alternativas a los áridos naturales.

2. Situación actual de la industria de los áridos naturales en Chile

En esta sección se presentará el estado actual de la industria de los áridos naturales en Chile destacando la situación del mercado, las dificultades de la producción y el control de los áridos utilizados en la industria de la construcción, así como los impactos ambientales de la industria.

2.1 Realidad actual del mercado del agregado en Chile

El mercado de los áridos en Chile tiene ciertas particularidades que hacen difícil su análisis y cuantificación. Es altamente descentralizado y desregulado para un recurso de naturaleza no renovable que requiere volúmenes importantes de manejo y extracción a lo largo del territorio nacional. Dependiendo de la zona geográfica del

país, la ubicación de los empréstitos y depósitos adecuados para la producción del material es fundamentalmente aleatoria, lo que dificulta aún más la caracterización del mercado.

Considerando lo anterior, las estimaciones del tamaño del mercado están basadas en información derivada del consumo y/o de la producción de materiales relacionados como el hormigón, asfalto o cemento. Además, se deben hacer supuestos importantes sobre el volumen del consumo, considerando las variables geográficas, económicas y sociales de la industria de la construcción, tanto a nivel de consumo industrial como del consumo distribuido a nivel de pequeños usuarios. Estimaciones hablan de que en el país se consumen 11.000.000 de metros cúbicos de áridos anuales (Revista Nueva Minería y Energía, 2022), aunque esta estimación es similar a una hecha en 2010 solo para la Región Metropolitana (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Ministerio de Obras Públicas y Cámara Chilena de la Construcción, 2001). Sin embargo, ambas fuentes denotan que solo se producen 4.000.000 de metros cúbicos de manera legal, completando los otros 7.000.000 con producción ilegal.

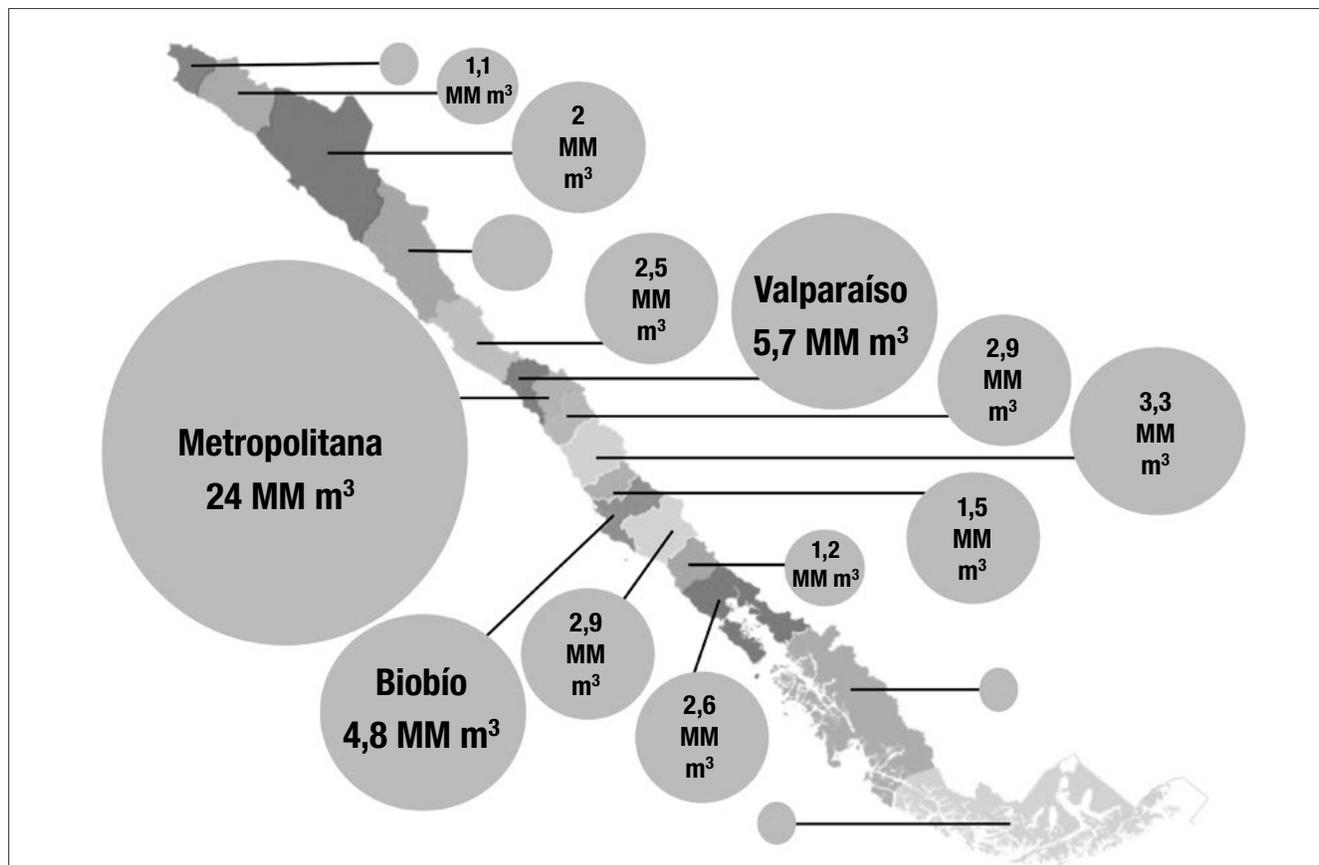
Si consideramos fuentes sobre consumo de cemento y consumo de hormigón (Centro de Información de la Cámara Chilena de la Construcción, 2024), toneladas de ligante asfáltico e importaciones de productos de construcción, además de indicadores sobre el consumo per cápita de este tipo de materiales en otras economías (United States Geological Survey, 2023), las estimaciones llegan a que en el país se consumen aproximadamente 57.000.000 de metros cúbicos de áridos. De estos, se calcula que entre un 60% y 70% son producidos de manera irregular (Villagra Saavedra, 2021). Si se desglosa por usos a nivel nacional, un 46% se dedica a la fabricación de hormigón, un 40% se usaría para rrel-

nos y usos relacionados, un 10% para bases y subbases en la construcción de caminos, un 4% para pavimentos asfálticos y menos de 1% para carpetas de rodado.

En lo que respecta a la distribución geográfica, tampoco existe una metodología única para determinar el consumo por unidad territorial. Sin embargo, si se hace el ejercicio distribuyendo por cantidad de población (ver Figura 1) (Menegaki y Kaliampakos, 2010; Tiess y Kriz, 2011), se estima que en la Región Metropolitana se consumen 23,9 millones de metros cúbicos de áridos, seguida por la región de Valparaíso con 5,8 millones de metros cúbicos y la región del Biobío, con 4,81 millones de metros cúbicos anuales. Si esta estimación se hace por el índice de actividad económica de cada región (medido como el porcentaje del PIB que representa cada región del total nacional) (Menegaki y Kaliampakos, 2010; Tiess y Kriz, 2011), tratando de acercarse a la realidad de la economía de cada región, lo que puede incluir ejecución de proyectos de construcción y relacionados, la Región Metropolitana consumiría 26,6 millones de metros cúbicos de áridos, la región de Antofagasta 5,1 millones de metros cúbicos anuales y la región de Valparaíso 4,7 millones de metros cúbicos. Estos números por sí solos son difíciles de dimensionar, pero si pensamos que el Estadio Nacional requiere 650.000 metros cúbicos, podríamos señalar que a nivel nacional se consumen aproximadamente 88 estadios nacionales cada año en áridos.

Lo que queda en relevancia con esto es que la industria de los áridos implica volúmenes importantes de material que extraer y distribuir. Por ello, es necesaria su gestión adecuada, con el fin de minimizar sus impactos y hacerlo más sustentable, entendiendo también que el desarrollo del país pasa por una correcta utilización de los recursos que dispone, sin dejar de lado toda la infraestructura necesaria para continuar con este desarrollo, sean viviendas, hospitales, caminos o complejos industriales.

Figura 1. Consumo de áridos por región, 2022



Fuente: Elaboración propia.

2.2 Dificultades actuales de la producción y control de la producción de áridos para la construcción en Chile

Como se mencionó anteriormente, las dificultades del mercado, intrínsecas a la naturaleza de este y extendidas no solo en Chile, sino generalizadas a nivel mundial, hacen que la producción del árido sea altamente propensa a la existencia de irregularidades, incluyendo la extracción ilegal.

La producción es principalmente desregulada debido a la dificultad misma del control de la extracción: esta se realiza principalmente a demanda, siendo rápidamente llevada fuera de los empréstitos, canteras y cauces de ríos, con poco material en comparación con los niveles de extracción realizados, siendo acumulado para momentos de demanda máxima de consumo. Este tipo de producción hace que su control sea dificultoso para los organismos relacionados.

Un segundo aspecto relevante es que el material se produce mayoritariamente de manera artesanal. La disponibili-

dad inmediata del recurso en estos lugares y el bajo equipamiento necesario para su transformación en un material habilitado para ser utilizado en proyectos de construcción hacen que con una mínima inversión se pueda extraer y transportar a puntos de consumo.

Derivado de los puntos anteriores, está lo relacionado con el control de la producción. Los altos volúmenes requeridos en la producción de áridos, relacionados con el crecimiento de la población y, por ende, de las necesidades de infraestructura y habitación, han conllevado al retraso de las capacidades de control por parte de los entes estatales, tanto a nivel de producción como a nivel de usuarios intermedios y finales. Esta situación se ve acrecentada por la extensión descentralizada y aleatoria de los puntos de extracción, el hecho de que es un recurso no renovable y que la demanda es altamente dependiente de proyectos intensivos realizados en cortos periodos de tiempo.

El control de las operaciones de extracción depende de la ubicación de estas: si se hace desde un terreno fiscal,

debe administrarla el Ministerio de Bienes Nacionales; si es un bien nacional de uso público, dependerá de su ubicación, pero se realiza desde cauces de ríos, siendo las municipalidades asesoradas por las Direcciones de Obras Hidráulicas, dependientes del Ministerio de Obras Públicas. Cuando la extracción es desde terrenos privados, como en el caso de muchos empréstitos, esta debe ser fiscalizada por la municipalidad respectiva. Además, todo proceso de extracción industrial debe estar sometido al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (Congreso de la República de Chile, 1994). Esta dispersión en los entes controladores facilita los esquemas y las operaciones ilegales: solo en el año 2020, en una inspección en las regiones de Arica y Parinacota, Antofagasta y Atacama, se estableció que existían 67 plantas ilegales de procesamiento de áridos (Ministerio de Bienes Nacionales, 2019). Por eso, además de ver cómo mejorar el uso del material y buscar alternativas en nuevas materialidades, se deben mejorar los aspectos normativos en cuanto al control de la producción, desde el punto de vista de los permisos y de quien ejerce la acción de control.

2.3 Impactos significativos de la industria de los áridos naturales

La industria de los áridos naturales es poco sustentable producto de los grandes impactos medioambientales, económicos y sociales que tiene la extracción y producción de estos recursos naturales. Estos impactos se ven exacerbados cuando la extracción de los áridos es de carácter ilegal. A continuación, se resumen los principales impactos de la industria de los áridos naturales.

2.3.1 Impactos medioambientales

Los áridos naturales son extraídos en su gran mayoría de canteras y de la ladera de los ríos, generando ambas alternativas grandes impactos ambientales. En ambos casos se debe remover la vegetación natural y el suelo superficial. Además, para realizar la extracción y molienda de los áridos, se utiliza maquinaria pesada que, la mayoría de las veces funciona con combustibles fósiles. Todo esto produce efectos adversos en el ecosistema, entre los cuales se destacan:

- Deterioro de la calidad del aire debido a la generación de material particulado, proveniente de las materias primas, y gases de efecto invernadero (por ejemplo, CO₂ y NO_x) a causa de la maquinaria utilizada (Petit et al., 2018). Este problema se ve incrementado en los casos de extracción ilegal de los agregados, debido a

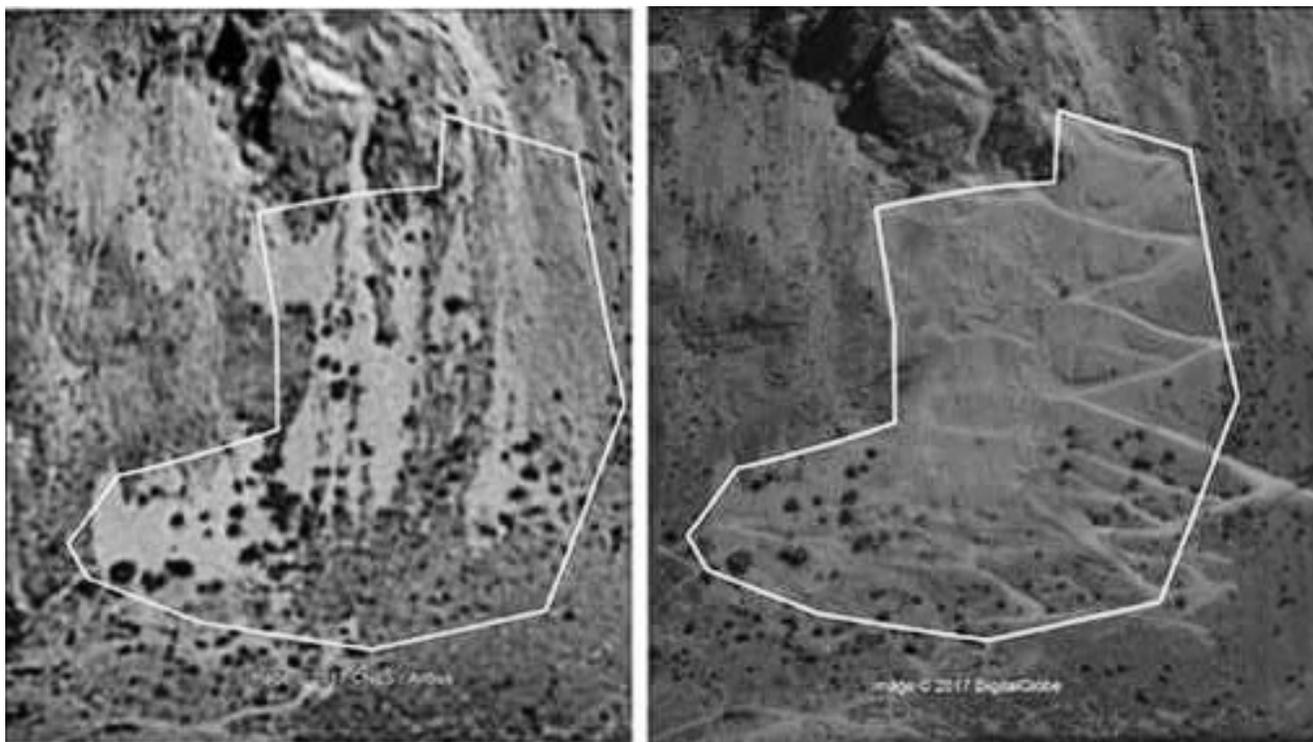
que la maquinaria en general es de peor calidad, sin cumplir con las mantenciones requeridas.

- Alteración de los cursos naturales de aguas superficiales y aguas subterráneas (Langer, 2016), producto de las modificaciones en la geografía de la rivera de los ríos y de las canteras, por la extracción del material para producir los áridos. Esto puede tener consecuencias negativas para la población y la vida silvestre, tales como: i) reducir la cantidad y calidad del agua potable; y ii) incrementar el riesgo de inundaciones producidas por las crecidas de los ríos, tal como ocurrió en reiteradas ocasiones durante el invierno de 2023 en la zona central del país. La extracción ilegal de áridos no se genera de forma planificada ni con el respaldo de estudios de impacto ambiental, por lo que sus efectos en la alteración de los cursos de agua suelen ser mayores.
- Aumento del riesgo de contaminación de cursos de agua superficiales y subterráneos (Conservation Ontario, 2018). Si bien extraer áridos de canteras no es un proceso contaminante de las aguas por sí solo, la remoción de material disminuye el tiempo que le toma a las sustancias contaminantes alcanzar las fuentes de aguas subterráneas. En el caso de la extracción de áridos a la orilla de los ríos, la operación de maquinaria en zonas cercanas a las fuentes de aguas puede provocar que estas se contaminen con aceites y combustibles.
- Ruidos y vibraciones excesivas producto de la maquinaria utilizada, lo cual produce perturbaciones tanto en la superficie como en el subsuelo (DigiEco-Quarry, 2021). En el caso de la extracción ilegal de agregados, en la cual no se cumple con la normativa correspondiente, este problema se ve incrementado.
- Uso de grandes extensiones de tierras. Considerando que en 2023 en Chile se utilizaron cerca de 57.000.000 de metros cúbicos anuales de áridos y que esta cifra se espera que aumente en los próximos años, se requieren grandes extensiones de tierras para su producción.
- Generación de desechos (Dias et al., 2022). Tal como se mencionó anteriormente, el proceso de extracción de áridos naturales involucra la remoción de vegetación natural y de suelos superficiales, lo cual genera volúmenes considerables de desechos que deben ser llevados a botaderos. Además, durante la fabricación de los áridos se producen cantidades significativas

de desechos industriales, a causa de la molienda y el transporte de grandes volúmenes de material.

- Uso de agua potable en la fabricación de áridos (Wayman, Hassan y Al-Kuwari, 2020). Actualmente la mayor parte de los áridos se obtiene mediante la molienda de rocas de gran tamaño extraídas de canteras (González et al., 2017). Esta molienda produce una gran cantidad de finos que contaminan a los áridos, los cuales tienen un efecto negativo en la calidad del hormigón (Kwan, Ng y Huen, 2014). Por lo tanto, actualmente los áridos deben ser sometidos a un proceso de lavado durante su fabricación, en el cual se usa agua potable.
- Destrucción de flora y fauna nativa (Rentier y Cameraat, 2022). Tal como se mencionó anteriormente, para realizar la extracción de los áridos naturales es necesario remover la vegetación superficial para realizar la extracción de los áridos. Esto puede generar consecuencias catastróficas en el ecosistema, lo cual se ve incrementado cuando la extracción es de origen ilegal. Por ejemplo, en 2016, la firma austriaca Strabag realizó extracción de áridos sin permiso en un área de preservación ecológica en la comuna de San José de Maipo, generando la destrucción de un bosque milenario de ciprés (Karmy, 2018), una especie en estado de gran vulnerabilidad. En la Figura 2 se puede observar el deterioro de este bosque entre 2007 y 2016.

Figura 2. Destrucción de bosque de ciprés por extracción sin permiso de áridos naturales



Izquierda: Año 2007; derecha, año 2016.
Fuente: Karmy, 2018.

2.3.2 Impactos económicos

La gran mayoría de los áridos producidos en el país son utilizados en industrias de gran relevancia para la economía, como la construcción, que usa sobre el 60% del total de ellos (Somayaji, 2001). Actualmente, tanto en Chile como en el resto del mundo, la extracción de áridos es realizada mayoritariamente por pequeñas y medianas empresas (DigiEcoQuarry, 2021). En el caso

particular de Chile, esta producción es fundamentalmente artesanal, lo cual genera efectos negativos en la eficiencia del proceso de fabricación y, por lo tanto, en el costo económico de estos (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Ministerio de Obras Públicas y Cámara Chilena de la Construcción, 2001; Villagra Saavedra, 2021). Esta baja industrialización causa un efecto negativo en los costos de la construcción y, por ende, en la economía del país.

Por otro lado, según datos de la Comisión de Áridos del Instituto de la Construcción de Chile, la demanda de este material triplica la producción del mercado formal. Esto se traduce en que sobre el 60% de los áridos producidos en el país son extraídos de manera ilegal (Molina y Maldonado, 2021). La preponderancia de un mercado ilegal genera los siguientes problemas intrínsecos a su informalidad:

- El mercado informal es significativamente menos productivo que las empresas formales. Según el estudio de Hsieh y Olken (2014), en promedio los trabajadores del mercado informal agregan solo un 15% del valor agregado por trabajador de empresas formales.
- Las remuneraciones pagadas en el mercado informal son en promedio la mitad de las remuneraciones pagadas por empresas formales pequeñas, y cerca de un tercio de lo pagado por empresas formales de mayor tamaño (Masello, 2020). Además, en general, no se realizan contratos entre el trabajador y la empresa, por lo que no se respetan las leyes sociales del trabajador, generando problemas en el ámbito de la salud y las pensiones.
- El mercado informal no paga impuestos. Además, en su mayoría, utilizan terrenos públicos para realizar su actividad, sin pagar por su uso (Ministerio de Bienes Nacionales, 2019). De esta forma, se genera una merma económica en el Estado al no recibir estos ingresos.

2.3.3 Impactos sociales

Para la producción de los áridos naturales se requiere operar con maquinaria pesada en un ambiente que cambia constantemente. Esto genera altas tasas de accidentabilidad y una mayor ocurrencia de lesiones de gravedad, haciendo que sea el sector industrial más peligroso. En esta industria el 6,8% de los accidentes son letales y sobre el 65% generan lesiones que requieren más de un mes de licencia (DigiEcoQuarry, 2021).

Por otro lado, las zonas de extracción de áridos tienen una vida útil de décadas por lo que, a pesar de estar inicialmente alejadas de los centros urbanos, el crecimiento de las ciudades está causando que muchas áreas de extracción queden rodeadas de zonas densamente pobladas. Su proximidad con los vecindarios genera conflictos sociales, tales como aumento en el tráfico y preocupaciones de los vecinos por la contaminación generada. Como se mencionó anteriormente, la extrac-

ción ilegal de áridos produce cambios en el curso de las aguas, lo cual aumenta el riesgo de la población ante crecidas de los ríos y problemas de la infraestructura por inestabilidad del terreno. Además, las comunidades que habitan en zonas cercanas están expuestas a los ruidos, vibraciones, contaminación del aire y del agua producidos por esta industria.

Asimismo, la extracción ilegal de áridos en la ribera de los ríos produce inestabilidad en las obras de infraestructura, tales como puentes, ductos y bocatomas. Esto, además de ser un riesgo inminente para la población, que se incrementa en un país sísmico como Chile, también puede provocar grandes pérdidas económicas producto de las reparaciones o incluso reconstrucciones de la infraestructura. Por otro lado, causa un aumento del riesgo de inundaciones, con sus consecuentes efectos para las personas, como ocurrió durante 2023, y un costo considerable de reconstrucción de infraestructura y vivienda.

3. Oportunidades de cambio y propuestas de alternativas a los áridos naturales

Considerando la situación actual de la industria de los áridos naturales, existen diversas oportunidades de mejora desde el punto de vista técnico y legislativo que permitirían disminuir los problemas. A continuación, se presentan las principales oportunidades de cambio que se pueden aplicar en el corto plazo y las alternativas que se pueden utilizar como reemplazo de los áridos naturales, con el fin de aumentar la circularidad en la industria de la construcción.

3.1 Oportunidades de cambio

La situación actual del mercado de los áridos naturales presenta diversos inconvenientes que están afectando el medioambiente, la economía y la sociedad del país, tal como se destacó en la sección 2 de este artículo. Sin embargo, existen distintas oportunidades de cambio de la industria de áridos, tanto a nivel normativo, de gobernanza e institucionalidad como a nivel técnico.

3.1.1 Cambios normativos

La normativa referente al uso de áridos ha demostrado estar desactualizada y no representa la realidad de la producción y el consumo de los áridos naturales. En este sentido, se debe separar la normativa en dos aspectos: sobre la explotación y control del recurso, por un lado; y sobre el uso y destino final del mismo, por el otro.

En lo que respecta a la explotación y control del recurso, las exigencias requeridas para la autorización de extracción de estos recursos son, en general, bastante claras y, dependiendo de la fuente de los áridos, deben ser visadas por entidades como el Ministerio de Bienes Nacionales, las municipalidades respectivas, el Ministerio de Medio Ambiente, la Autoridad Marítima, las Direcciones de Obras Hidráulicas regionales, el Servicio de Evaluación Ambiental, etc. Sin embargo, los tiempos de tramitación y la cantidad de solicitudes que reciben algunos de estos estamentos hacen que el proceso sea visto como lento y poco óptimo, lo que puede dar espacio a la apertura de espacios de explotación sin el debido permiso y, evidentemente, sin los controles adecuados. En este sentido, y al igual que con otros tipos de proyectos, es de esperar que se pueda avanzar hacia un ordenamiento jurídico y de permisos que facilite la tramitación, atendiendo a las necesidades del mercado en cuanto a contar con este material de construcción, sin dejar de lado el cumplimiento de aspectos regulatorios sociales y medio ambientales. Es una discusión que está en curso (boletines 15096-09 y 15676-09 refundidos, desde el Senado de la República) y que permitirá avanzar hacia una optimización de la burocracia necesaria, para ordenar la apertura y cierre de operaciones de extracción de áridos, su operación y control.

Relacionado con lo anterior, es necesario actualizar la legislación respecto al mal uso de estos recursos, su explotación indiscriminada y al daño que genera en el entorno, tanto natural (modificación de cauces, por ejemplo) como humano (a la infraestructura). Esto se hace aún más importante en la situación actual de cambio climático, que generará mayores problemas y situaciones críticas para comunidades e infraestructura. En este sentido, y en conjunto con el ordenamiento jurídico para el control de la explotación, se ha estado impulsando desde el Senado el proyecto de ley que unifica el cuerpo de normas que aplica para la ejecución de proyectos relacionados con la extracción de áridos, como fue mencionado anteriormente. Sin embargo, los tiempos de este tipo de iniciativas muchas veces no son lo suficientemente rápidos ante el impacto que genera esta actividad. A la fecha, el proyecto se encuentra en su primer trámite constitucional en el Senado (Congreso de la República de Chile, 1994).

En el aspecto del uso mismo del material y su destino final (entendido como dónde se va a utilizar), se está abriendo de a poco dentro de la industria de la cons-

trucción la posibilidad de usar nuevas alternativas para el reemplazo de los áridos naturales. Desde 2021, está en discusión en el Instituto Nacional de Normalización (INN) una nueva norma de áridos para hormigones, que permitirá utilizar tanto áridos de hormigón reciclado (RCA) como áridos artificiales¹. Ambas son alternativas relevantes, considerando que muchos son obtenidos de residuos de otras industrias, fomentando además la circularidad dentro de los proyectos de construcción.

En definitiva, es de esperar que un nuevo corpus normativo facilite la gestión de permisos para la extracción de agregados, respetando y profundizando en los requerimientos ambientales necesarios para realizar una actividad en armonía con el entorno social y natural. Esto podría actuar tanto desde el punto de vista del control como de la fluidez en la apertura de nuevos puntos de extracción. Además, entregaría herramientas y facilidades para el control de estas operaciones, ordenando jerárquicamente a todos los estamentos estatales encargados (desde municipalidades para arriba), incluyendo la entrega de fondos para la gestión de estas unidades. Esto podría incluir desde organismos nuevos o nuevas potestades para organismos existentes, hasta facilidades para la persecución y el castigo al uso indiscriminado y extracción ilegal del recurso. Finalmente, la normativa debe fomentar la economía circular permitiendo, facilitando e, incluso, obligando a los actores a buscar la reducción de los impactos que genera esta actividad.

3.1.2 Gobernanza adecuada

La capacidad de control por parte del Estado de las actividades clandestinas de extracción de áridos (e incluso de las actividades efectuadas bajo el amparo de la ley) se ve mermada por la dispersión de las entidades que por ley están obligadas a efectuarlo, como también, muchas veces, por el poco conocimiento de la normativa a aplicar en estos casos. Los principales puntos de extracción o los que generan mayores problemas ambientales en el país están en cauces de ríos, cuyos principales entes controladores son las municipalidades (autorizadas por la Dirección de Obras Hidráulicas en lo relativo a los permisos otorgados) y el Ministerio de Medio Ambiente, a través de la Superintendencia respectiva. Como se ve en INN (2013), las municipalidades no pueden ejercer un control exhaustivo sobre los puntos de producción. No alcanzan los recursos, normalmente escuálidos, para hacer gestión y control sobre la producción de áridos,

1 Norma NCh163 “Áridos para morteros y hormigones: Requisitos generales”.

la cual, además, se efectúa muchas veces fuera de la ley. Por eso, es necesario generar una nueva forma de control y gestión de la producción de áridos. Entre las alternativas factibles está potenciar unidades de control en las municipalidades y en el Ministerio de Medio Ambiente, pensando en que muchos puntos de extracción y producción, legales e ilegales, están en territorios con menos recursos disponibles.

Otro camino posible es sacar completamente el aspecto de control de la producción y fiscalización de las municipalidades, tal como se hace con otras actividades, dejando a estas solo temas administrativos y de cobro de permisos. Incluso, servicios especializados en fiscalización de actividades similares, como el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), podrían participar de esta fiscalización, atendiendo a la experiencia y las similitudes entre la industria de la minería y la industria de la producción de los áridos.

3.1.3 Nuevas oportunidades para reemplazar a los áridos naturales

En los últimos 50 años la demanda por materiales para la construcción se ha cuadruplicado a nivel mundial (Allwood, Cullen y Milford, 2010). Esto ha provocado que actualmente exista una crisis mundial en la disponibilidad de los áridos (Meredith, 2021). Además, considerando que el crecimiento exponencial de la población mundial conllevará un incremento en la infraestructura necesaria, se espera que la crisis de los áridos se vea profundizada en el futuro próximo. Sumado a este problema se encuentran los efectos medioambientales, sociales y económicos que produce la industria de los áridos naturales, los cuales se describieron en la sección 2 de este artículo. Por estas razones, a nivel mundial se han desarrollado diversas iniciativas cuyos objetivos son encontrar fuentes alternativas a las naturales para la producción de áridos. Entre las alternativas más promisorias y estudiadas se encuentra el uso de áridos reciclados y la fabricación de áridos artificiales a partir de subproductos industriales. Ambas alternativas permitirían aumentar la circularidad de la industria de la construcción.

Hoy en día el 70% de los residuos de construcción y demolición corresponden a áridos, los cuales pueden ser reutilizados para la fabricación de nuevos materiales de construcción (Tam, Soomro y Evangelista, 2018). Sin embargo, actualmente en Chile menos del 10% de los residuos de la industria de la construcción y demolición son valorizados, siendo el resto enviado a botaderos (Molina y Maldonado, 2021). El uso de áridos reciclados

de la construcción permitiría contribuir a la circularidad en la industria, disminuyendo la extracción de materias primas y minimizando los grandes volúmenes de desechos (Ferone et al., 2013; Terzić et al., 2015). Entre estas iniciativas se encuentran algunas enfocadas al uso de subproductos que presentan las características mecánicas, químicas y físicas que son compatibles con los materiales de construcción, entre los cuales destaca el uso de escorias de alto horno (Speight, 2016), un subproducto de la industria acerera y de los relaves provenientes de la minería (Lam et al., 2020). Otras iniciativas más incipientes han estado enfocadas en la fabricación de áridos a partir de la aglomeración de desechos industriales, tales como cenizas volantes (Rivera et al., 2015), provenientes de las centrales termoeléctricas, vidrio (Arriagada, Navarrete y López, 2019) y relaves mineros (Thomas, Damare y Gupta, 2013). El uso de estos agregados contribuiría a la circularidad en la industria de la construcción al utilizar desechos industriales en reemplazo de recursos naturales no renovables para la fabricación de estos.

Si bien las alternativas antes mencionadas son oportunidades emergentes que pueden aportar a solucionar el problema de los agregados naturales, todavía hay limitaciones técnicas y legislativas que restringen su uso. En la sección “3.2. Economía Circular para la Construcción” se profundizará sobre los avances técnicos y normativos que se tienen que realizar para que estas soluciones sean adaptadas de forma masiva a nivel nacional.

3.1.4 Resiliencia en la industria de la construcción y la infraestructura

El desarrollo de alternativas a los áridos naturales, apoyado por cambios normativos y una gobernanza adecuada, permitiría suplir parte de la demanda que hoy no es posible cubrir con la producción autorizada, disminuyendo de esta forma el mercado ilegal. Esto podría traer múltiples ventajas para la resiliencia en la infraestructura, es decir la capacidad de estas de funcionar y satisfacer las necesidades de los usuarios durante y después de un peligro natural, y en el desarrollo de la construcción.

La extracción de áridos naturales genera modificaciones en la geografía de los ríos y de los cerros de los cuales estos son extraídos. Esto produce que la infraestructura del país se encuentre expuesta a un deterioro acelerado producto de inundaciones y movimientos de tierras que no ocurrirían si es que el terreno no hubiera sido perturbado. Esto es de alto riesgo considerando que sobre el 60% de la extracción de áridos en Chile tiene un origen

ilícito (Molina y Maldonado, 2021), lo cual implica que en su ejecución no se tiene considerado un plan de mitigación ambiental que disminuye los daños de la actividad.

La extracción de áridos de los bordes de río, en el límite entre la zona de excavación y el lecho natural del río, produce una depresión brusca en el fondo del cauce. Esto genera un aumento local de la pendiente y, por lo tanto, un incremento en la velocidad del flujo, generando de esta forma una socavación del cauce aguas arriba (Conesa García y Pérez Cutillas, 2014). Este fenómeno deja en situación vulnerable a las estructuras que se encuentran aguas arriba, tales como puentes, ductos y bocatomas, pudiendo producir que las fundaciones de las estructuras queden sin soporte, generando su falla

por hundimiento. Según un estudio encargado por la Dirección de Obras Hidráulicas (Díaz et al., 2015), la extracción excesiva de áridos de la cuenca del río Maipo ha influido en la reducción de su fondo, lo cual ha provocado socavación de las fundaciones de varios puentes (ver Figura 3). De hecho, según un reportaje de La Tercera (Montes, 2023), la Bocatoma Independiente, que abastece de agua potable a la mayor parte de la Región Metropolitana, está en riesgo producto de la degradación del río Maipo. Otro caso emblemático es el desplome del puente Cancura, en 2018, en la Región de Los Lagos, el cual produjo el fallecimiento de una persona y que se pudo deber a la extracción ilegal de áridos realizada en las cercanías del puente (Briones, 2018).

Figura 3. Puente del río Maipo deteriorado por la socavación de las fundaciones



Fuente: Baertl, 2023.

En el caso de la extracción de áridos a partir de canchales, las cuales generalmente están ubicadas en cerros, se pueden generar deslizamientos de suelos, afectando a estructuras colindantes. Por ejemplo, a inicios de 2023, los habitantes de Cochamó realizaron una denuncia producto de la extracción de áridos de manera ilegal de un cerro cercano a sus viviendas, que podría generar un deslizamiento de tierra (Valenzuela y Subiabre, 2023). Otro ejemplo fue lo que ocurrió el año 2021 en la Región del Maule, donde la extracción de áridos de manera ilegal

produjo un deslizamiento de tierra que destruyó algunas viviendas y el descarrilamiento del tren que conecta a las ciudades de Talca y Constitución (Somayaji, 2001).

Por otro lado, actualmente existe una disminución de permisos otorgados para poder extraer áridos de manera legal. Esto va en contrasentido de la mayor demanda de este material, lo cual puede ser un incentivo para la apertura de nuevos centros de extracción ilegal de áridos. Además, al ser pocas empresas las que produ-

cen el material, la disponibilidad de este para las futuras construcciones se ve significativamente afectada por la escasez que puede ocurrir en regiones con pocos centros legales de extracción. Por otro lado, los centros urbanos, en los cuales se requiere una mayor demanda de infraestructura, también suelen tener una mayor disponibilidad de demoliciones y de desechos industriales. Por lo tanto, utilizar estos desechos para la fabricación de áridos permitiría tener una mayor cantidad de centros de producción de áridos, aumentando la resiliencia de la industria de la construcción a la fabricación y extracción de áridos naturales.

3.2 Economía circular para la construcción

La industria de la construcción es una de las principales fuentes de empleos y de ingresos de los distintos países. Sin embargo, también es una de las principales fuentes de consumo de energía, emisiones de CO₂ y generación de desechos. En esta línea, reemplazar los áridos naturales por alternativas más sustentables podría ayudar a disminuir los impactos de la industria de la construcción y avanzar hacia una economía circular. En esta sección se discutirá sobre las alternativas más promisorias a los áridos naturales a nivel mundial.

3.2.1 Áridos reciclados

Además de los problemas de sustentabilidad de la industria de los áridos descritos en la sección 2.3, la construcción genera cantidades significativas de desechos sólidos que terminan en botaderos. Por ejemplo, el 35% de toda la basura generada en la Unión Europea corresponde a desechos de la industria de la construcción y demolición (Villoria Sáez y Osmani, 2019). Además, se espera que año a año aumente la cantidad de estos desechos, debido a la mayor demanda de infraestructura. Los áridos son el principal desecho de la construcción y demolición, contribuyendo con el 85% del total generado (Tam, Soomro y Evangelista, 2018). Por lo tanto, la reutilización y reciclaje de áridos puede traer grandes beneficios a la circularidad de la industria de la construcción.

Diversos países han tomado iniciativas enfocadas en incentivar la reutilización de los desechos de la industria de la construcción y demolición. En 2008 la Unión Europea acordó, a través de la *E.U. Waste Framework Directive (2008/98/EC)* (EU Directive, 2008), que para 2020 todos los países miembros debían reutilizar al menos un 70% de los desechos generados por la industria de la construcción. Según el reporte final publicado por la Unión Europea en 2017, de un total de 27 países miem-

bro, 14 estaban reciclando sobre el 70% y seis sobre el 60% de los materiales de desecho (Deloitte, 2017). Por lo tanto, se puede observar que una política de Estado de este tipo puede tener un efecto significativo en los niveles de reciclaje de desechos de un país.

En el caso de Chile el 2016 se promulgó la Ley de Reciclaje y Responsabilidad Extendida del Productor (Ley N° 20.920 o Ley REP), la cual obliga a los productores de productos prioritarios a hacerse responsable de la organización y financiamiento de la gestión de los residuos derivados de la comercialización de sus productos en Chile (Ministerio de Relaciones Exteriores, 2016). Actualmente los productos que están definidos como prioritarios son: i) neumáticos; ii) envases y embalajes; iii) aceites lubricantes; iv) aparatos eléctricos y electrónicos y pilas; y v) baterías. Dado que se tiene esta ley marco, si se incluyera en el futuro próximo los desechos de la industria de la construcción y demolición, se incentivaría de manera significativa el uso de áridos reciclados como reemplazo de los naturales. Sumado a esto, el año 2020 se estableció la Hoja de Ruta RCD Economía Circular en Construcción, la cual establece que para 2035 se proyecta valorizar el 70% de los residuos de la construcción (González, 2020).

Los nuevos estándares y regulaciones de países desarrollados especifican las características que deben cumplir los áridos reciclados para poder ser utilizados con distintos fines, los cuales van desde la confección de elementos no estructurales, hasta la construcción de elementos que requieren hormigones de alta resistencia. La mayoría de estos estándares especifican las características físicas y mecánicas que deben cumplir los áridos reciclados, tales como densidad, absorción de agua, resistencia intrínseca, resistencia a la abrasión, entre otras (Reis et al., 2021). En general, estos estándares limitan el nivel de reemplazo de la arena natural por arena reciclada hasta un 20%, mientras que en el caso de los áridos gruesos puede ser reemplazado hasta en un 100% por árido reciclado (Kenai, 2018). El nivel de reemplazo está limitado por la calidad del árido reciclado, por la resistencia requerida por el hormigón y por las condiciones de exposición ambiental.

En los últimos cinco años, en Chile se ha estado discutiendo la actualización de la norma NCh163, la cual establece los requisitos para los áridos de morteros y hormigones. En esta actualización, que debería ser publicada durante 2024, se establecen los requisitos de control de producción y de comportamiento que deben

cumplir los áridos reciclados para ser utilizados en la fabricación de hormigón. Por lo tanto, se podría esperar un aumento significativo en el uso de los áridos reciclados en el país, ya que se establecerían los requerimientos con los cuales deben cumplir para ser utilizados.

Desde el punto de vista técnico, la principal diferencia de los áridos naturales con los áridos reciclados es que estos últimos tienen una capa de pasta de cemento adherida en la superficie, la cual es proveniente de la mezcla de hormigón original (Raigandhi, Mane y Kore, 2015). Esta capa suele ser altamente porosa y, por lo tanto, produce un efecto negativo en el desempeño de los productos fabricados con estos áridos (Omary, Ghorbel y Wardah, 2016). Por ejemplo, reemplazar los áridos naturales por áridos reciclados en la fabricación de hormigón genera una disminución en su resistencia a la compresión y a la flexión, además de aumentar su permeabilidad, lo cual causa una disminución en la durabilidad de los elementos construidos (Fanijo et al., 2023). Estos efectos son más significativos en los áridos de menor tamaño (por ejemplo, arenas y polvos de roca) que en los de mayor tamaño (gravillas y gravas) (Zega y Di Maio, 2011). Además, al ser un material de desecho, los áridos reciclados presentan una variabilidad en sus propiedades mayor a la de los naturales (Yehia y Abdelfatah, 2016).

En los últimos años, en Chile y en el extranjero, se han estudiado y desarrollado tratamientos de los áridos reciclados, que permiten disminuir e incluso eliminar los efectos negativos en las propiedades de los materiales de construcción basados en estos áridos (Raman y Ramasamy, 2021). Las principales líneas de investigación y desarrollo han estado enfocadas en las posibilidades de remover la capa de pasta de cemento adherida a los áridos o en disminuir la porosidad de esta. Con respecto a la remoción de la pasta de cemento de los áridos reciclados se han desarrollado tratamientos térmicos (Pandurangan, Dayanithy y Om Prakash, 2016), mecánicos (Dilbas, Çakir y Atiş, 2019), entre otros. Por otro lado, con relación a la disminución de la porosidad de la pasta de cemento que recubre los áridos reciclados se han utilizado nanomateriales (Allujami et al., 2022), biodeposición (Sharma et al., 2023), soluciones poliméricas (Spaeth y Djerbi Tegguer, 2013), técnicas de curado de CO₂ (Kou, Zhan y Poon, 2014), entre otras.

Desde el punto de vista de una industria circular, el curado de CO₂ destaca por sobre el resto. Esta metodología permitiría utilizar las emisiones de CO₂ generadas por la industria de la construcción, encapsulando este gas den-

tro del árido y evitando que este llegue a la atmósfera. Considerando que los áridos representan más del 70% del volumen del hormigón y sobre el 90% del volumen de las mezclas asfálticas, esto podría tener un efecto significativo en reducir las emisiones de CO₂ generadas por la industria de la construcción, las cuales representan sobre el 40% de las emisiones totales generadas por la humanidad (Olivier, Schure y Peters, 2017).

3.2.2 Áridos artificiales con base en desechos industriales

Los volúmenes de consumo de áridos hacen que el mismo recurso se vuelva cada vez más escaso. Una razón para esto es el agotamiento de las fuentes de calidad de áridos, las regulaciones crecientes y la dificultad para extraer desde fuentes confiables sin afectar la sustentabilidad y la seguridad de comunidades cercanas. Esto se combina con una disponibilidad cada vez más lejana de centros de consumo relevantes y con las dificultades logísticas para el transporte de áridos en el país: mientras en otros países de Europa o Norteamérica un buen porcentaje de los áridos son transportados en tren o por vía fluvial, en Chile el 100% es transportado por carretera.

Entendiendo esta dificultad adicional del mercado local, hay investigación y creciente interés en usar áridos artificiales, que pueden reemplazar en parte o totalmente a los áridos naturales, dependiendo de las características del elemento en el que se utilizarán. Esto permitiría mejorar los indicadores de sustentabilidad de su utilización.

Dentro de los áridos artificiales, se distinguen los preparados desde materias primas directamente para su uso en la construcción y los que provienen de residuos de otras industrias y son transformados para usarlos como áridos. Ambos enfoques ofrecen una alternativa relativamente reciente y factible de ser utilizada en materiales de construcción como hormigones o rellenos.

Entre los primeros, tenemos áridos de arcilla expandida o de vidrio expandido, ambos livianos, que permiten entregar características especiales a hormigones como baja densidad o un curado prolongado para mejorar la resistencia. Estos áridos están disponibles de manera comercial en varios países (no en Chile por el momento) y su utilización está regulada en algunas normas internacionales.

Entre los segundos, podemos contar con áridos de escorias de hierro o cobre, áridos aglomerados de cenizas o relaves, entre otros. Este grupo de agregados permite utilizar volúmenes relevantes de un residuo generado por otra industria, absorbiendo parte del impacto que

genera la disposición de esos desechos, además de disminuir el uso de material extraído de la naturaleza para utilizarlo como árido en la construcción. Hay varias investigaciones recientes y aplicaciones en desarrollo para usar estos agregados. Entre los más relevantes por su potencial de utilización y disponibilidad de las materias primas para el mercado chileno están:

- **Áridos de cenizas volantes:** desarrollados con las cenizas provenientes de plantas termoeléctricas, son áridos livianos aglomerados o sintetizados que permiten disminuir la densidad del hormigón o proveer de espacio para uso en bases y subbases de pavimentos. Existe bastante desarrollo científico y tecnológico sobre el uso de estos agregados (Rivera et al., 2015; Öz et al., 2021; Luhar y Luhar, 2022).
- **Áridos de escorias:** estos áridos provienen de procesos mineralúrgicos de producción de hierro o cobre. Son agregados hechos directamente de la molienda de escorias, de densidades elevadas que permiten reemplazar volúmenes importantes de material en hormigones, rellenos y otros usos, sin afectar el comportamiento mecánico. Serán incorporados prontamente en la normativa que permite su uso en hormigones, al tener experiencia de uso en otros países (Faleschini, De Marzi y Pellegrino, 2014; Wang, 2018; Jiang y Ling, 2020).
- **Áridos de relave:** existe experiencia en el uso de parte de relaves como reemplazo de agregado fino, aunque también se puede hablar de agregados gruesos aglomerados mediante procesos de peletización o sinterización. No es tan común aún, sin embargo, los volúmenes de relave en el país lo hacen un candidato ideal para ser utilizado en aplicaciones masivas como rellenos, bases y subbases de pavimentos (Mun et al., 2007; Oluwasola et al., 2014).

4. Conclusiones

En este artículo se presentó una revisión de la situación actual de la industria de los áridos naturales a nivel nacional y se destacaron posibles oportunidades de cambios normativos y alternativas a los áridos naturales que permitirían avanzar hacia una economía circular, generando una industria de la construcción más sustentable y una infraestructura más resiliente. A partir de este análisis se destacan las siguientes conclusiones:

- La situación actual de la industria de los áridos naturales genera problemas medioambientales, eco-

nómicos y sociales significativos, los cuales se han visto incrementados debido a que una parte importante de la industria opera de manera ilícita.

- La extracción ilegal de áridos ha generado diversos problemas en la infraestructura, como el colapso de puentes, descarrilamiento de trenes e, incluso, la destrucción de viviendas. Por lo tanto, disminuir este mercado ilegal a través de una mejor regulación y del uso de áridos alternativos a los naturales, permitiría mejorar la resiliencia de la infraestructura nacional. Esto se verá facilitado mediante la implementación de la nueva regulación que está actualmente en trámite.
- En las últimas décadas se han desarrollado áridos a partir de desechos de la construcción y de otras industrias, los cuales, con un desarrollo técnico y un apoyo gubernamental mediante el desarrollo de nuevas normas que permitan y regulen sus usos, podrían reemplazar una parte significativa del mercado de los áridos naturales.
- El uso de áridos reciclados contribuiría al desarrollo de una industria de la construcción más sustentable al disminuir la necesidad de extraer recursos naturales como también la cantidad de desechos generados. Además, el uso de los áridos reciclados es una oportunidad incipiente de disminuir la huella de carbono de la industria.
- El uso de agregados artificiales, por otra parte, permitiría fomentar la economía circular al utilizar residuos de otras industrias e incorporar materiales nuevos en la construcción, disminuyendo el volumen de áridos extraídos y procesados desde la naturaleza. Chile tiene la potencialidad de usar varios tipos de residuos como materiales de relleno para caminos y reemplazo de los áridos en hormigones.
- La normativa ha quedado retrasada en el uso de nuevos materiales en la construcción, lo que ha afectado la introducción de reemplazos de los áridos. Sin embargo, se está avanzando en nuevas normas que permitirán la incorporación de alternativas sustentables y provenientes de residuos de otras industrias (como minería y generación eléctrica) o de la misma construcción (áridos reciclados de hormigón).
- Desde el punto de vista de la regulación de la producción de áridos, hay un retraso y falencias en la gestión de esta industria, por lo que también están avanzando iniciativas que podrán actualizar los reglamentos y leyes que se le aplican.

Referencias

- Al-Bayati, H.K.A. et al.** (2016). Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 112, pp. 284-298. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.176>
- Allujami, H.M. et al.** (2022). Nanomaterials in recycled aggregates concrete applications: mechanical properties and durability. A review. *Cogent Engineering*, 9(1). Disponible en: <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2122885>
- Allwood, J.M., Cullen, J.M. y Milford, R.L.** (2010). Options for Achieving a 50% Cut in Industrial Carbon Emissions by 2050. *Environmental Science & Technology*, 44(6), pp. 1888-1894. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/es902909k>
- Arriagada, C., Navarrete, I. y López, M.** (2019). Understanding the effect of porosity on the mechanical and thermal performance of glass foam lightweight aggregates and the influence of production factors. *Construction and Building Materials*, 228, p. 116746. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116746>
- Arróspide, F., Mao, L., & Escarriaza, C.** (2018). Morphological evolution of the Maipo River in central Chile: Influence of instream gravel mining. *Geomorphology*, 306, 182–197. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.01.019>
- Baertl, L.** (2023, August 22). El río Maipo, en situación grave. <https://www.Ciperchile.Cl/2023/08/22/El-Rio-Maipo-En-Situacion-Grave/>.
- Briones, N.** (2018). Desplome del Cancura: vecinos acusaron desde 2011 extracción ilegal de áridos en el puente. *Radio Bio Bio*.
- Centro de Información de la Cámara Chilena de la Construcción** (2024). Disponible en: <https://cchc.cl/centro-de-informacion/indicadores/indice-despacho-de-cemento>
- Chi Yin, S. y Beiser, V.** (2018, March 15). Dramatic Photos Show How Sand Mining Threatens a Way of Life in Southeast Asia. <https://www.Nationalgeographic.Com/Science/Article/Vietnam-Mekong-Illegal-Sand-Mining>.
- Conesa García, C. y Pérez Cutillas, P.** (2014). Alteraciones geomorfológicas recientes en los sistemas fluviales mediterráneos de la Península Ibérica: Síntomas y problemas de incisión en los cauces. *Revista de Geografía Norte Grande*, (59), pp. 25-44. Disponible en: <https://doi.org/10.4067/S0718-34022014000300003>
- Congreso de la República de Chile** (1994). *Ley N° 19300 de Bases Generales del Medio Ambiente*.
- Congreso de la República de Chile** (no date). *Informe de la Comisión de Obras Públicas, recaído en el proyecto de ley, en primer trámite constitucional, que regula la extracción de áridos*. Disponible en: <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmID=26245&prmTIPO=INFORMEPLY>
- Conservation Ontario** (2018). *Drinking Water Source Protection: Aggregate Industry*. Ontario.
- Deloitte** (2017). *Deloitte Study on Resource Efficient Use of Mixed Wastes, Improving management of construction and demolition waste—Final Report*.
- Dias, A. et al.** (2022). Environmental and Economic Comparison of Natural and Recycled Aggregates Using LCA. *Recycling*, 7(4), p. 43. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/recycling7040043>
- Díaz, M. et al.** (2015). *Estudio evaluación y modelación hidráulica-sedimentológica física y matemática del río Maipo para el seguimiento de explotaciones de áridos y obras de protección existentes en el sector confluencia río Clarillo a puente Naltahua, Región Metropolitana*. Santiago.
- DigiEcoQuarry** (2021). *Main Challenges In The Aggregates Industry*. Disponible en: <https://digiecoquarry.eu/>
- Dilbas, H., Çakır, Ö. y Atis, C.D.** (2019). Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized Ball Milling Method. *Construction and Building Materials*, 212, pp. 716-726. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.007>
- Eckholt, J.** (2024, January 18). La lucha de los vecinos del río Mapocho contra areneros y vertederos. Chilevisión.
- EU Directive - European Union** (2008). *98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives*.
- Faleschini, F., De Marzi, P. y Pellegrino, C.** (2014). Recycled concrete containing EAF slag: Environmental assessment through LCA. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18(9), pp. 1009-1024. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.922505>
- Fañijo, E.O. et al.** (2023). A comprehensive review on the use of recycled concrete aggregate for pavement construction: Properties, performance, and sustainability. *Cleaner Materials*, 9, p. 100199. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100199>
- Ferone, C. et al.** (2013). Coal combustion wastes reuse in low energy artificial aggregates manufacturing. *Materials*, 6(11), pp. 5000-5015. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ma6115000>
- González, C.** (2020). *Hoja de ruta de economía circular en la construcción proyecta valorizar el 70% de sus residuos al 2035*.
- González, M. et al.** (2017). Sustainable decision-making through stochastic simulation: Transporting vs. recycling aggregates for Portland cement concrete in underground mining projects. *Journal of Cleaner Production*, 159, pp. 1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.012>
- Hsieh, C.-T. y Olken, B.A.** (2014). The Missing “Missing Middle”. *Journal of Economic Perspectives*, 28(3), pp. 89–108. Disponible en: <https://doi.org/10.1257/jep.28.3.89>

- INN (2013). *NCh 163.Of2013 Áridos para Hormigón y Morteros*.
- Jiang, Y. y Ling, T.C. (2020). Production of artificial aggregates from steel-making slag: Influences of accelerated carbonation during granulation and/or post-curing. *Journal of CO2 Utilization*, 36, pp. 135-144. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.11.009>
- Karmy, J. (2018). Contratista de Alto Maipo destruye bosque milenario de ciprés con permisos municipales fuera de la ley. *El Ciudadano*. Disponible en: <https://www.elciudadano.com/chile/contratista-alto-maipo-destruye-bosque-milenario-cipres-permisos-municipales-la-ley/01/10/>
- Kenai, S. (2018). *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*. 1st edn. Elsevier.
- Kou, S.-C., Zhan, B. y Poon, C.-S. (2014). Use of a CO2 curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 45, pp. 22-28. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.008>
- Kwan, A.K.H., Ng, P.L. y Huen, K.Y. (2014). Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 61, pp. 270-277. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.022>
- Lam, E.J. et al. (2020). Making Paving Stones from Copper Mine Tailings as Aggregates. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7), p. 2448. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph17072448>
- Langer, W. (2016). Sustainability of aggregates in construction. *Sustainability of Construction Materials*. Elsevier, pp. 181-207. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100370-1.00009-3>
- Luhar, I. y Luhar, S. (2022). A Comprehensive Review on Fly Ash-Based Geopolymer. *Journal of Composites Science 2022*, Vol. 6 (8), p. 219. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/JCS6080219>
- Masello, D. (2020). Problemas actuales de la economía informal. Desventajas de una definición generalista del empleo informal para sociedades desequilibradas. *Inter Disciplina*, 9(23), p. 15. Disponible en: <https://doi.org/10.22201/cei-ich.24485705e.2021.23.77344>
- Meredith, S. (2021). *A sand shortage? The world is running out of a crucial - but under-appreciated - commodity*, CNBC. Disponible en: <https://www.cnbc.com/2021/03/05/sand-shortage-the-world-is-running-out-of-a-crucial-commodity.html>
- Menegaki, M. E. y Kaliampakos, D. C. (2010). European aggregates production: Drivers, correlations and trends. *Resources Policy*, 35(3), 235-244
- Ministerio de Bienes Nacionales (2019). *Extracción Ilegal de áridos*. Santiago, Chile. Disponible en: <https://www.bienes-nacionales.cl/?p=34472>
- Ministerio de Relaciones Exteriores (2016). *Nueva Ley de Reciclaje: Chile avanza en sus compromisos medioambientales con la OCDE*.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Ministerio de Obras Públicas y Cámara Chilena de la Construcción (2001). *Industria del Árido en Chile: Tomo I. Sistematización de antecedentes técnicos y ambientales*. Edited by Corporación de Desarrollo Tecnológico.
- Molina, J. y Maldonado, C. (2021). Incorporación de áridos artificiales y reciclados al hormigón: el cambio clave que abre la puerta a la economía circular en la construcción. *País Circular*.
- Montes, C. (2023). Extracción de áridos: Denuncian que degradación de orillas del río Maipo amenaza consumo de agua de Santiago. *La Tercera*, 22 de marzo.
- Mun, K.J. et al. (2007). Influence of fine tailings on polyester mortar properties. *Construction and Building Materials*, 21(6), pp. 1335-1341. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.021>
- Olivier, J.G.J., Schure, K.M. y Peters, J.A.H.W. (2017). *Trends in Global CO2 and Total Greenhouse Gas Emissions*, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Disponible en: <http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2017-summary-trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2983.pdf>
- Oluwasola, E.A. et al. (2014). Potentials of steel slag and copper mine tailings as construction materials. *Materials Research Innovations*, 18, pp. S6-250-S6-254. Disponible en: <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.000000000966>
- Omary, S., Ghorbel, E. y Wardeh, G. (2016). Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Construction and Building Materials*, 108, pp. 163-174. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.042>
- Öz, H.Ö. et al. (2021). Fly-ash-based geopolymer composites incorporating cold-bonded lightweight fly ash aggregates. *Construction and Building Materials*, 272, p. 121963. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.CONBUILD-MAT.2020.121963>
- Pandurangan, K., Dayanithy, A. y Om Prakash, S. (2016). Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 120, pp. 212-221. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.093>
- Petit, A. et al. (2018). Novel air classification process to sustainable production of manufactured sands for aggregate industry. *Journal of Cleaner Production*, 198, pp. 112-120. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.010>
- Raigandhi, S.D., Mane, S.S. y Kore, S.B. (2015). Use of Recycled Concrete Aggregates. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 3(7), pp. 218-221. Disponible en: <http://www.ijraset.com/file-serve.php?FID=3026>
- Raman, J.V.M. y Ramasamy, V. (2021). Various treatment techniques involved to enhance the recycled coarse aggregate in concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 45, pp. 6356-6363. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.935>

- Reis, G.S. et al.** (2021). Current Applications of Recycled Aggregates from Construction and Demolition: A Review. *Materials*, 14(7), p. 1700. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ma14071700>
- Rentier, E.S. y Cammeraat, L.H.** (2022). The environmental impacts of river sand mining. *Science of The Total Environment*, 838, p. 155877. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155877>
- Revista Nueva Minería y Energía** (2022). Disponible en: <https://www.nuevamineria.com/revista/aridos-los-minerales-olvidados-en-chile/>
- Rivera, F. et al.** (2015a). Massive volume fly-ash concrete: A more sustainable material with fly ash replacing cement and aggregates. *Cement and Concrete Composites*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.08.001>
- Sharma, H. et al.** (2023). Effect of various bio-deposition treatment techniques on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, 66, p. 105868. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105868>
- Somayaji, S.** (2001). *Civil Engineering Materials*. 1st edn. Prentice Hall.
- Spaeth, V. y Djerbi Tegguer, A.** (2013). Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(2), pp. 143-152. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2014.03.003>
- Speight, J.G.** (2016). *Asphalt Materials Science and Technology*. 1st edn. Elsevier. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-15469-4>
- Tam, V.W.Y., Soomro, M. y Evangelista, A.C.J.** (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications (2000-2017). *Construction and Building Materials*, 172, pp. 272-292. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>
- Terzic, A. et al.** (2015). Artificial fly ash based aggregates properties influence on lightweight concrete performances. *Ceramics International*, 41(2), pp. 2714-2726. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.086>
- Thomas, B.S., Damare, A. y Gupta, R.C.** (2013). Strength and durability characteristics of copper tailing concrete. *Construction and Building Materials*, 48, pp. 894-900. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.075>
- Tiess, G. y Kriz, A.** (2011) Aggregates Resources Policies in Europe Development of IT solutions for the Enhancement of Planning & Permitting Procedures. *International Journal of Environmental Protection*, 1(3), 54-61
- United States Geological Survey** (2023). *Mineral Commodity Summaries 2023*, United States Geological Survey.
- Valenzuela, P. y Subiabre, D.** (2023). Denuncian extracción de áridos en cerro colindante a casas en Cochamó: podría provocar deslizamiento. *Radio Bio Bio*.
- Villagra Saavedra, S.A.** (2021). *Levantamiento y perspectivas del mercado de áridos en la Región de Los Ríos*. Universidad Austral de Chile.
- Villoria Sáez, P. y Osmani, M.** (2019). A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union. *Journal of Cleaner Production*, 241, p. 118400. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118400>
- Wang, G.C.** (2018). *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03995-0>
- Wayman, M., Hassan, K.E. y Al-Kuwari, M.S.** (2020). Water Footprint Analysis of Construction Aggregates in Qatar. En *Towards a Sustainable Water Future: Proceedings of OICWE2020*. ICE Publishing.
- Yehia, S. y Abdelfatah, A.** (2016). Examining the Variability of Recycled Concrete Aggregate Properties. En *International Conference on Civil, Architecture and Sustainable Development (CASD-2016)*. London, UK: International Institute of Engineers. Disponible en: <https://doi.org/10.15242/iicbe.dir1216403>
- Zega, C.J. y Di Maio, Á.A.** (2011). Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Management*, 31(11), pp. 2336-2340. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.011>

CÓMO CITAR ESTA PUBLICACIÓN:

Navarrete, I. y Vargas, F. (2024). Nuevos áridos para la construcción: hacia una economía circular para una industria más sustentable y una infraestructura más resiliente. *Temas de la Agenda Pública*, 19(171), 1-16. Centro de Políticas Públicas UC.

Centro UC

Políticas Públicas



www.politicaspUBLICAS.uc.cl
politicaspUBLICAS@uc.cl



SEDE CASA CENTRAL

Av. Libertador Bernardo O'Higgins 340, piso 3, Santiago.
Teléfono (56) 2 2354 6637.



SEDE EDIFICIO PATIO ALAMEDA

Av. Libertador Bernardo O'Higgins 440, piso 12, Santiago.
Teléfono (56) 2 2354 5658.