

Materiales de construcción con residuos industriales de vertederos ecológicamente invasivos



Bloque elaborado con lodo de papel. [Foto: autor]

Alfonso Alfonso González

RESUMEN: Se aborda, desde una visión actual, la posibilidad de ampliar los tipos de residuos industriales utilizados en materiales de construcción, con la intención adicional de contribuir a la mitigación de sus vertederos. Se examina la situación internacional existente relativa a materiales apropiados de construcción elaborados con desechos sólidos y se analizan con un enfoque metodológico cualitativo, las propiedades de materiales develadas por resultados de investigaciones científicas experimentales precedentes conducidas en varios países sobre ese tema por el autor del presente trabajo con sus colaboradores. Con ese fin, se describen las cualidades y valoran las propiedades de materiales de construcción con residuos industriales de diversos vertederos ecológicamente invasivos y se concluye sobre aspectos físicos, higiénicos, ambientales y socioeconómicos a considerar para ampliar o desestimar su uso.

Palabras clave: residuos industriales, materiales apropiados de construcción, vertederos de desechos sólidos industriales, vertederos ecológicamente invasivos.

Building Materials with Industrial Wastes from Polluting Dumping Places

ABSTRACT: From a current perspective, the possibility of expanding the types of industrial waste used in construction materials is addressed, with the additional intention of contributing to the mitigation of their landfills. The existing international situation regarding appropriate construction materials made with solid waste is examined. In this article we also analyzed with a qualitative methodological approach, the properties of materials revealed by the results of previous experimental scientific investigations conducted in several countries on that subject by the author of the present work with his collaborators. To that end, the qualities and values of the properties of construction materials have been described with industrial waste from various ecologically invasive landfills. The conclusions provide criteria on physical, hygienic, environmental and socioeconomic aspects to consider extending or rejecting their use.

Keywords: waste matter, industrial residues, appropriate building materials, industrial waste landfills, polluting waste dumps.

Sección: Con Criterio

Temática: Materiales de construcción con residuos

RECIBIDO: 15 de diciembre de 2017 APROBADO: 5 de enero de 2018

Introducción

Desde hace varias décadas, se ha registrado una tendencia internacional dirigida al aprovechamiento de recursos locales en los materiales de construcción, con la finalidad de disminuir costes económicos; hacer descender el gasto energético y consumo de naturaleza, reducir contaminantes y gases con efecto invernadero; e incluso, la búsqueda de un hábitat saludable. [1-3] Una de las vías recurridas ha sido utilizar residuos, fibras naturales y otros recursos locales en la elaboración de materiales apropiados de construcción. [4-6]

Antecedentes nacionales de las últimas tres décadas:

La mencionada tendencia también se registró activamente en Cuba, particularmente durante la profunda crisis económica iniciada en los años 90. En la búsqueda de nuevos materiales y elementos de construcción se destacaron los obtenidos por Jorge Acevedo en el Centro de Estudios de Arquitectura Tropical, (CECAT), en La Habana, entre los que se encontraba la aplicación de soluciones asfálticas acuosas calientes en la construcción, y el cemento hidrófugo obtenido con cera de la caña de azúcar que facilitó, entre otros, la producción de tejas TEVI y del panel hueco ensamblable con diseño del autor del presente artículo. (Figura 01). Son también muy sobresalientes los resultados obtenidos e implementados en la práctica por Fernando Martirena Hernández y sus colaboradores de la Facultad de Construcciones de la Universidad Central de Las Villas (UCLV) sobre la obtención de cementos y materiales apropiados de construcción de bajo costo. Por otro lado, Manuel Urrutia investigó posibilidades para reutilizar residuos de demoliciones de obras, lo que aplicó a un prototipo de vivienda experimental en La Lisa, La Habana.

Entre otros antecedentes en el país, se obtuvo de forma experimental, un aglomerante cal-puzolana en 1992-93, mediante la calcinación lenta de bolos semisoterrados de cal mezclada con bagazo de caña de azúcar.¹ Por otro lado, entre 1991 y 1992 se realizaron experimentos con elementos elaborados en prensas CINVA-RAM de mezclas de cemento con arcilla tipo Capdevila para aplicarlos en La Güinera, en La Habana,² y se construyó en 1992-93 en el barrio Cocosolo, en Marianao, La Habana, (Figura 02) un edificio multifamiliar experimental de bloques de suelo local estabilizado con bajo consumo de cemento, con la colaboración del *Weiterbildungs Institut für Städtebau und Architektur WB Tropen und Auslandsbau*.³



Figura 01: Muro experimental construido en el CECAT por Alfonso y Acevedo con paneles huecos ensamblables de cemento hidrófugo y terminación integral de las caras expuestas [Foto: autor]



Figura 02: Edificio experimental de viviendas según diseño de A. Alfonso y construido en 1991-92 con ladrillos de suelo cemento en el barrio Cocosolo, en La Habana, con la colaboración directa del Departamento Tropenbau, HAB, Weimar, [Foto: autor]

Resultados obtenidos con viviendas de tierra estabilizada, presentados por el autor del presente trabajo al Concurso Iberoamericano Habiterre, Navápalos, España, en 1992, contendieron por la obtención del Primer Premio con el proyecto Geomorada, de México. En 1998, se concibió el proyecto de una vivienda uniplanta⁴ con materiales de construcción elaborados con desechos industriales extraídos de un vertedero de la ciudad de Cochabamba, Bolivia. (Figura 03).



Figura 03. Sistema de construcción para viviendas compuesto con elementos producidos con desechos industriales procedentes del vertedero de Cochabamba, Bolivia, elaborado en 1998-99 en la Maestría en Ciencias de la Construcción desarrollada por el CECAT en la Universidad Mayor de San Simón por Buitrago y Gareca, con A. Alfonso como consultor y J. Flores tutor. [Foto: autor]



Figura 04: Construcción de ladrillos elaborados con residuos de origen minero, con el patrocinio de la UEAH, en México, para dar uso a los desechos minerales acumulados durante varias décadas en la localidad. Foto: [6].

Situación global actual: A nivel global, en numerosos países han aparecido grandes volúmenes de residuos depositados en extensos vertederos que deterioran amplias áreas del territorio, y muchos de ellos, a pesar de la existencia de políticas, leyes, numerosas regulaciones y normativas para su prevención y gestión, en muchas ocasiones producen un creciente perjuicio al medio ambiente. [1] [7] [8] [9] Han sido clasificados los distintos tipos de vertederos según: la naturaleza, origen y composición de los desechos que recolectan; grado y categoría de nocividad (peligrosos, inertes, no peligrosos); vectores y mecanismos de dispersión; criterios o modalidades de tratamiento, manejo y control aplicados, entre otros. [1] [19] En dependencia de cada caso existen indicaciones para su control, gestión y manejo ambiental. [10] [11] Entre las recomendaciones para contrarrestar y mitigar los efectos de los vertederos, además de la prevención, minimización, eliminación, reciclaje y recuperación energética, se ha aconsejado internacionalmente la conveniencia de reutilización de sus residuos. [12] [13] [14]. Sin embargo, las referencias de las aplicaciones con esos fines últimos, se han centrado principalmente en el vidrio, papel, plástico, metal y diversos materiales orgánicos de origen agrícola, [2] [5] [15] mientras que son escasos los avances para utilizar una mayor gama de residuos industriales diversos en la producción de materiales de construcción. [14] (Figura 04). Ha sido reconocido que el uso de residuos industriales con esos fines, -además de sus efectos económicos, ahorro de consumo material, conservación de naturaleza, reducción del consumo energético y consecuente disminución de la contaminación atmosférica-, podría contribuir a mitigar el impacto nocivo de los vertederos. Ello condujo a definir el presente objeto de investigación.

Propósitos: Al respecto, se propuso examinar, desde una visión actual, la posibilidad perspectiva de ampliar la variedad de residuos industriales que se utilizan en materiales de construcción, lo cual, simultáneamente podría contribuir a contrarrestar el volumen de la deposición [4] [10] [11] [16] y a incrementar la construcción local de viviendas económicas. En el presente trabajo se consideran ecológicamente invasivos los vertederos en los cuales los residuos o desechos depositados originan algún efecto negativo al medio ambiente o se desbordan e invaden extensivamente al territorio.

El autor se apoyó en la revisión de fuentes internacionales relacionadas con el tema, y aplicó métodos comparativos con un enfoque cualitativo a resultados previos propios, obtenidos como director, conductor, asesor y/o participante en investigaciones científicas experimentales (la mayoría inéditas) desarrolladas en años precedentes, en las cuales se determinaron, mediante ensayos realizados a escala de laboratorio, las diversas cualidades físicas y químicas de materiales de construcción elaborados con diversos residuos industriales procedentes de vertederos invasivos en varios países.

Materiales y métodos

Con un enfoque metodológico híbrido, predominantemente cualitativo, métodos comparativos y alcances descriptivo-explicativos, dirigidos a investigar la posibilidad de ampliar los diversos tipos de residuos aprovechables para elaborar materiales de construcción, de viviendas económicas y contribuir así a mitigar sus vertederos, [8] [14] [15] [17] [18] se definió el problema siguiente: ¿es posible identificar e incrementar la variedad de residuos industriales, para elaborar materiales de construcción y contribuir adicionalmente, a mitigar vertederos ecológicamente invasivos.?

El objetivo general radicó en: constatar si un mayor número y variedad de residuos industriales podrían ser utilizados como materiales apropiados de construcción, y adicionalmente contribuir a mitigar vertederos invasivos al medio ambiente.

Si se asume que el reúso de residuos contribuye a mitigar los vertederos, las preguntas principales a despejar serían las siguientes: ¿es posible ampliar la diversidad de residuos industriales procedentes de vertederos ecológicamente invasivos, para su utilización en materiales de construcción?, ¿Cuáles serían los requisitos y los principales aspectos a tener en cuenta?, ¿Cuáles serían los principales inconvenientes, obstáculos, posibilidades y ventajas?

Información disponible y enfoques aplicados: Teniendo en cuenta la información obtenida de la revisión de fuentes internacionales sobre el tema y los resultados de investigaciones experimentales desarrolladas por el propio autor y sus colaboradores durante años anteriores sobre la temática, se seleccionaron varios casos (la mayoría inéditos) en los cuales habían sido identificadas las cualidades de materiales de construcción producidos con residuos de vertederos ecológicamente invasivos de diversos países (Cuba, México y Angola). Las referidas investigaciones fueron desarrolladas o avaladas por universidades de cada país⁵ y patrocinadas por prestigiosas instituciones científicas. Sobre cada lugar, se disponía de información sobre las características socioeconómicas, necesidades construcción de viviendas, recursos económicos, técnicos y humanos disponibles y las tradiciones constructivas existentes en cada territorio, estudiadas previamente en las investigaciones referidas. Se contó con la información elaborada acerca de los diversos residuos industriales y las cualidades de las mezclas, así como las peculiaridades y condiciones de las industrias y los vertederos de procedencia. Por tratarse de residuos industriales, fue necesario proceder a examinar con prioridad los aspectos ambientales y de salud involucrados. Se analizaron las conclusiones y resultados disponibles sobre el cumplimiento de los requerimientos de las normas relativas a las propiedades resistentes, físico-químicas, así como sobre peligrosidad /

inocuidad para las personas, y riesgos de daños al territorio, [9] [18], para verificar la posibilidad de ser usados o no, como materiales de construcción de viviendas.

Las investigaciones experimentales realizadas a las muestras en las referidas investigaciones, - confeccionadas con variadas proporciones de los componentes y ensayadas según distintos tiempos de curado-, tuvieron en cuenta los requisitos establecidos por las normas nacionales, e internacionales, así como normativas y regulaciones locales. Se consideraron los resultados disponibles sobre las propiedades de resistencia a la compresión -de muestras húmedas y secas-, al impacto; al punzonamiento, y al fuego (ignición), así como el comportamiento de la absorción de agua; valores de la ascensión capilar, adherencia, etc. En ciertos casos se investigaron las cualidades térmicas (calor específico, masa volumétrica, conductividad y resistencia térmica, retraso y amortiguamiento térmico, etc.) También fueron valoradas la apariencia visual, cambios de volumen, deformación geométrica, inocuidad para las personas (posible presencia de sustancias tóxicas, radioactivas, corrosivas, etc.), así como la factibilidad y facilidad de elaboración práctica de las mezclas y elementos constructivos. Las cualidades referidas fueron examinadas en función de su posible implementación práctica. Los materiales elaborados se destinarían a construir viviendas económicas.

Estudio de casos: Se establecieron criterios de selección, atendiendo a que los casos cumplieran con lo siguiente: 1)- residuos de diferentes tipos, origen y características, 2)- procedencia de vertederos que ejercieran algún efecto invasivo o nocivo sobre el medio ambiente, 3) empleo de modalidades diversas para el mezclado y elaboración de los materiales, y 4)- existencia de resultados propios de investigaciones previas que identificaran las cualidades de los materiales involucrados y 5)- necesidad de construir viviendas económicas en las respectivas zonas.

Los casos seleccionados fueron los siguientes:

- a- Desecho de la producción de la fábrica de acetileno en Río Verde, La Habana, Cuba.
- b- Lodo de papel de la planta de reciclado San Francisco, Mxli. Baja California, México.
- c- Deposición de partículas sólidas precipitadas de las emisiones geotérmicas en la Planta Geotermoelectrica de Cerro Prieto, Mxli., Baja California, México.
- d- Cenizas de residuos de la producción agroindustrial de aceite Elaeis en Uige, Angola.

También fueron incluidos y analizados, materiales a cuyas mezclas se les añadía algún otro tipo de residuo adicional diferente, tales como:

- e)- desecho de arcilla calcinada triturada acumulados en tejares inactivos, Cuba,
- f)- cenizas de bagazo de la producción de azúcar de caña, Uige, Angola.

Resultados

Caso a: Residuos de la producción de la fábrica de acetileno de Río Verde, Cuba

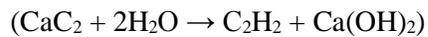
La severidad de la crisis del denominado Período Especial en Cuba promovió la búsqueda de soluciones alternativas de materiales de construcción con bajo o ningún consumo energético⁶.

La planta de producción de acetileno de Río Verde, en Boyeros, La Habana se encontraba localizada en las afueras de la ciudad atendiendo al riesgo conocido que implicaba la manipulación, almacenamiento y transportación de las materias primas y el proceso de producción del gas acetileno, lo cual ha sido descrito por numerosas fuentes [19] [20] [21]. Los riesgos de la industria son atribuidos a los tipos de reacciones que intervienen en el proceso productivo, a la nocividad o peligrosidad de los componentes y del gas acetileno, pero con respecto a las impurezas del residuo resultante (cal hidratada), no se reportaban aspectos críticos documentados.

El desecho obtenido como resultado de la producción, era depositado en una depresión topográfica colindante con la fábrica y conformaba una masa de sedimento pastoso color grisáceo

que avanzaba sobre el territorio, invadiendo y exterminando la flora vegetal natural existente (Figura 05)

Teniendo en cuenta lo anterior, fueron exploradas las posibilidades de utilizar el hidróxido de calcio generado en el proceso productivo del gas acetileno, resultante de la reacción: [19] [22]



Tal residuo, en teoría, podría ser potencialmente empleado con una función equivalente a la de la cal apagada en los materiales de construcción, cuya combinación con puzolanas pulverizadas adquiere en presencia de humedad, propiedades aglomerantes. (puzolana+cal+agua).

Con ese fin, porciones de arcilla calcinada residual finamente triturada, procedente de vertederos abandonados de varios tejares próximos que permanecían inactivos en esa época debido a falta de energía, fueron mezcladas con partes de la cal apagada extraída del vertedero de Río Verde. La mezcla de ambos develó un comportamiento similar al de la cal-puzolana descrito en fuentes bibliográficas tradicionales. [23].

En las primeras aplicaciones, el material aglomerante fue utilizado directamente como mortero de asiento y relleno en muros de mampuesto ordinario de piedras, obteniéndose buenos resultados de resistencia a la compresión y adherencia en los prototipos construidos. Adicionalmente, la mezcla referida se combinó con porciones de suelo arcilloso tipo Capdevila abundante en la localidad, -previamente tamizado-, y se conformaron series de probetas cuadriformes con diferentes proporciones de sus componentes. Los ensayos realizados en el laboratorio del CECAT, arrojaron propiedades físicas apropiadas⁷ para la construcción de viviendas uniplanta.

El material obtenido localmente adquirió en ese entonces la denominación de “Cero-cemento”. (Figura 06). Análisis posteriores continuados por el CECAT, sobre la composición química del vertedero, develaron entre las impurezas acompañantes del proceso de producción de gas acetileno, trazas de sustancias potencialmente tóxicas⁸, lo que inhabilitó al material para su uso.

Caso b: Lodo de papel de la planta de reciclado de papel San Francisco, México

Internacionalmente el desecho de papel se encuentra entre los materiales más reciclados. El 90% de la pasta de papel utiliza madera, por lo que su reciclaje posibilita el reúso de ese material para reducir el consumo de celulosa.

En Mexicali, Baja California, se localiza la Fábrica de Papel San Francisco (FAPSA), -cuyo origen se remonta a 1956-, donde se procesan: papel higiénico, servilletas, y toallas de cocina.



Figura 05: Imagen de la masa semilíquida residual del vertedero invasivo del área vegetal colindante con la planta productora de gas acetileno de Río Verde. [Foto: autor]



Figura 06: Muestra cuadriforme elaborada con suelo estabilizado con arcilla cocida triturada y residuo de cal apagada del vertedero de Río Verde. [Foto: autor]

Como parte del proceso de reciclado industrial, se genera en la fase final del proceso de reciclado, un desecho conocido como "lodo de papel", en el cual las fibras ya no pueden ser aprovechables comercialmente por tener dimensiones excesivamente cortas y se convierten en el desecho final del proceso. Las aguas residuales usadas en el blanqueado, que se separan de las fibras, son enviadas a la depuradora para someterlas a una etapa fisicoquímica y otra biológica, donde se produce la extracción del residuo final de los lodos del papel. [24]

La fibra ultracorta inservible, usualmente era trasladada en estado semi-húmedo al vertedero convenido para su deposición, con los respectivos costes de transportación y almacenamiento. El volumen de producción actualmente sobrepasa las 10 toneladas por día. La celulosa, ceniza, tintas y agua; representan un 57 % de sólidos, en los cuales el 82 % es fibra de celulosa y el 18 %, ceniza. [25].

Como antecedente, los intentos de reutilizar el lodo de papel mezclado con cemento Portland para la producción de bloques de construcción, no tenía éxito a causa de las notables deformaciones de la geometría de los bloques y elementos constructivos durante el proceso de secado, lo cual impedía la elaboración de especímenes, e incluso, de probetas apropiadas para realizar los ensayos de laboratorio. Otros inconvenientes radicaban en el contenido de cloro residual de la solución blanqueadora, así como las dificultades derivadas del comportamiento y mezclado de la masa húmeda del residuo orgánico de celulosa con el cemento hidráulico.

Un estudio socioeconómico de la región evidenció una acentuada necesidad de construcción de viviendas económicas para los sectores populares de bajos ingresos, con materiales apropiados para las extremas condiciones climáticas cálido-secas locales, a cuya solución podría contribuir el aprovechamiento de residuos industriales de la zona. Patrocinado por la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Baja California, (UABC) sede Mexicali, el autor del presente trabajo y sus colaboradores⁹ presentaron un protocolo de investigación, dirigido a encontrar procedimientos tecnológicos efectivos para la producción de materiales con residuos del lodo de papel, el cual mereció en 1996 el Premio del Concurso de Investigación convocado por la Escuela de Ingeniería de la UABC, en Ensenada, Baja California.

Para la preparación de las probetas y especímenes con el lodo de papel, se neutralizó de la solución acuosa, el contenido de cloro disuelto en la masa líquida, y a la fibra remanente se le adicionó cal apagada con el propósito de mineralizarla para facilitar su desempeño efectivo con el cemento hidráulico Portland, por ser la celulosa un material orgánico. (Tabla 01) El mezclado homogéneo con el cemento aglomerante se realizó con el lodo de papel aun en estado húmedo y se dosificó la mezcla según diferentes proporciones de cemento.

Tabla 01: Caracterización del lodo de papel de la planta San Francisco (mineralizado) [25]

PRUEBA	NORMA	RESULTADO	OBSERVACIONES
Peso específico	ASTM C128	1,74 gr/cm ³	Agregados finos
Peso volumétrico suelto	ASTM C29	345 kg/m ³	8% de humedad
Peso volumétrico compactado	ASTM C29	391 kg/cm ³	

La tendencia a la deformación geométrica de los testigos durante el tiempo de curado y secado se impidió mediante la inmersión prolongada en estanques de la mezcla en moldes rígidos, similar al proceso utilizado en Cuba por los especialistas del CECAT y SOFONIA para la producción de las tejas TEVI con cemento hidrófugo, el cual permite controlar las deformaciones de la geometría. Este procedimiento permitió elaborar, bloques sólidos (ladrillos) (Figura 07) y otros elementos constructivos con diversos espesores y tamaños. Posteriormente, aplicando las Normas ASTM, pudieron ser determinadas en el laboratorio del CECAT las propiedades de resistencia a la

compresión, al impacto, punzonamiento, absorción de agua, capilaridad, ignición, transmisión térmica, etc. Los ensayos evidenciaron cualidades satisfactorias para la construcción. Las propiedades de aislamiento térmico conductividad térmica, calor específico y masa volumétrica, fueron particularmente sobresalientes. La vulnerabilidad encontrada con respecto al fuego y a la absorción de agua resultaba factible de ser controlable con la aplicación de aditivos, revocos hidrófugos protectores, impregnaciones hidrorrepelentes, u otros recursos. Por su ligereza y cualidades de resistencia mecánica este bloque resultaba idóneo para la construcción en el clima desértico cálido-seco extremo de la región de origen del residuo.

Con posterioridad a los resultados descritos, numerosas fuentes han referido la producción de elementos de construcción (Figura 08) en varios países a partir del uso de mezclas elaboradas con lodo de papel utilizando diversas técnicas [24] [26] [27] [28]



Figura 07 Espécimen sólido con cemento y lodo de papel mineralizado procedente de la fábrica de reciclado de papel San Francisco, en Baja California, elaborado en el CECAT con técnicas de inmersión prolongada [Foto: autor]



Figura 08 Muestra de ladrillo con lodo de papel producido por extrusión en la Escuela Politécnica Superior de Linares de la Universidad de Jaén Foto: [28].

Caso c: Partículas sedimentadas de las emisiones geotérmicas, Cerro Prieto, Mx

Sobre una extensa superficie del Valle de Mexicali, cerca de la frontera norte de México, se vierte -para facilitar la evaporación- una solución acuosa procedente del proceso de condensación de las emanaciones geotérmicas de 184 pozos que emergen a la superficie a altas temperaturas. Se trata de la fuente energética actual que utilizan las cinco unidades de la planta Geotermoeléctrica de Cerro Prieto, cuya construcción se inició en 1958 en Baja California, México. Es la central de energía geotérmica más importante en el ámbito internacional, cuya capacidad instalada actual ya excede los 800 MW. [29]. Se localiza en un área geológicamente ubicada dentro del patrón tectónico de la falla de San Andrés, (Figura 09)



Figura 09: Vista aérea satelital del territorio donde se localiza la planta Geotermoeléctrica de Cerro Prieto, aledaño a cultivos agrícolas, a 30 Km de Mexicali, Baja California, Mx [Foto: Google Maps].

Al evaporarse la solución acuosa, el área es cubierta por una capa esponjada de mineral sólido particulado volante, de color blanco brillante, denominado localmente “sílice”, o también “arena sílice”. (Tabla 02) al que se le responsabiliza de producir severos estragos y contaminación ambiental. El vapor endógeno de los pozos en operación del campo geotérmico induce una brisa salina que baña los campos aledaños las 24 horas del día, disemina las partículas que invaden y deterioran extensiones equivalentes a 230 ha de tierra circundante, arruinando la fertilidad del suelo agrícola. (Figura 10) La planta emite a la atmósfera 166 millones 440 mil tons de CO₂ /año. [30].

Tabla 02: Caracterización de la arena sílice de Cerro Prieto [25].

PRUEBA	NORMA	RESULTADO	OBSERVACIONES
Índice de actividad puzolánica	ASTM C311.618	85 %	Mínimo requerido a los 14 días =75%
Peso específico	ASTM C128	1.63 gr/cm ³	Agregados finos
Peso volumétrico suelto	ASTM C29	326 kg/m ³	17% de humedad
Peso volumétrico compactado	ASTM C29	473 kg/m ³	
Granulometría	ASTM C331.332	Pasa la malla 4 (4.75mm)	Agregados ligeros para piezas de construcción



Figura 10: Imagen panorámica ofrecida por la Comisión Federal de Energía (CFE) que muestra las emisiones de vapores geotérmicos de los pozos de Cerro Prieto, Mx. Foto: [38].

El controvertido vertedero ha sido objeto de intensas polémicas ambientalistas, incluyendo protestas de la población local. Se afirma que en la evaluación ambiental realizada por algunas instituciones a los depósitos a cielo abierto de salmuera geotérmica, se ha reconocido que se infringen las regulaciones ambientales federales, [29] [30], pero el problema no ha sido aun oficialmente esclarecido, ni resuelto.

El residuo en cuestión, desde el punto de vista de sus posibilidades como material de construcción, posee las propiedades características de las puzolanas, debido a que sus compuestos mineralógicos de sílice tienen un comportamiento reactivo frente a la cal en presencia de agua, y dan lugar a compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como aglomerantes hidráulicos. Se le puede clasificar, por su origen, como una puzolana natural.

Atendiendo a que la región presentaba una extrema necesidad de viviendas económicas para la población local de bajos ingresos, investigadores de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) en 1994-95 habían ya realizado acciones para elaborar elementos de construcción con el material particulado en estado sólido, lo que simultáneamente podría contribuir a mitigar el efecto negativo del vertedero. ([Figura 11).

Posteriormente, con la participación del autor del presente trabajo y la colaboración de varios colaboradores de alta calificación,¹⁰ se elaboró, patrocinado por la Escuela de Arquitectura de la UABC, un Protocolo de Investigación dirigido a encontrar soluciones científicamente fundamentadas, para incrementar el uso del material “arena de sílice” en elementos de construcción, el cual mereció el apoyo del Comité de Baja California, del Instituto del Fondo Nacional para la Vivienda de los Trabajadores de México (INFONAVIT) y recibió el Premio de Investigación de la UABC en 1996.

Mediante investigación experimental se determinaron las posibilidades de aprovechar la actividad puzolánica del material sílice mezclado con cal, para obtener bloques de dimensiones convencionales con cualidades satisfactorias de resistencia a la compresión, al impacto, al punzonamiento, así como la absorción de agua, ascensión capilar, apariencia visual y transmisión térmica. [25] Los análisis químicos de laboratorio y de posible radiactividad realizados simultáneamente en laboratorios acreditados de México y EUA bajo normas ASTM a series de muestras procedentes de distintos pozos emisivos, develaron en general, inocuidad radioactiva y química, pero en algunos de ellos se detectaron impurezas residuales de ciertas sustancias tóxicas¹¹.

Con posteridad, por parte del mismo colectivo de autores¹² fueron elaboradas mezclas que combinaban “arena sílice” y lodo de papel con cemento. (Figura 12). El lodo de papel también se mineralizó con cal apagada para favorecer su combinación con el cemento Portland,¹³ pero en esta ocasión se mezcló en estado seco y se le adicionó una porción limitada de agua jabonosa. Para el curado de las probetas se recurrió al método de saturación en cuarto húmedo. Los resultados obtenidos de resistencia a la compresión a los 28 días (Tabla 03) fueron satisfactorios, e igualmente favorable fue la comparación realizada con respecto a bloques de hormigón, ladrillos y adobes (Tabla 04). El material con arena de sílice y lodo de papel evidenció propiedades ventajosas (aun ensayado con probetas húmedas). Resultó un 15 % menos resistente a la compresión con respecto al bloque de hormigón, pero un 47 % mayor al ladrillo común y 76 % mayor que la del adobe [25].



Figura 11: Elementos diversos de construcción elaborados por en Mexicali a principios de la década de los años 90, utilizando residuos de arena sílice de Cerro Prieto, Mx. [Foto: autor]



Figura 12: Bloque elaborado por investigadores de la Facultad de Arquitectura de Baja California (UABC), Mx., utilizando arena sílice y lodo de papel mineralizado. Foto:

Tabla 03. Características de la mezcla con arena sílice + lodo de papel reciclado [25].

PROPIEDAD	FLUIDEZ	MASA VOLUMÉTRICA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN
Norma	ASTM C109	ASTM C303	ASTM C67
Resultado	20 – 25 %	855 Kg/m ³	34 Kg/cm ²

Tabla 04: Comparación de la resistencia a la compresión y masa volumétrica de la mezcla sílice + lodo papel + cemento. [25]

MATERIAL	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Kg/cm ²	MASA VOLUMÉTRICA (kg/m ³)
Ladrillo común	18	1800
Adobe con suelo local	8	1620
Sílice-lodo de papel	34	855
Bloque de hormigón	40	2100

Las cualidades térmicas se incluyeron entre las mayores fortalezas del material con mezcla de arena sílice-lodo de papel, lo que fue constatado en una investigación exhaustiva realizada al respecto. La importancia de este análisis se derivaba de las condiciones de temperaturas extremas de zonas desérticas secas, que especialmente en el sitio investigado se registraban con frecuencia las más altas del planeta. Los resultados mostraron valores favorables al ser comparados con los de bloques de hormigón, ladrillos de arcilla cocida y adobe, referidas por una fuente especializada. (Tabla 05). Los valores de amortiguamiento, retraso térmico y resistencia térmica recogidos en la tabla 05, correspondieron a especímenes de 0,15 cm de espesor.

Tabla 05: Propiedades térmicas de bloques elaborados con mezcla sílice-lodo-cemento, comparadas con las de otros materiales de construcción. [25]

PROPIEDADES	LADRILLO	ADOBE	SÍLICE-PAPEL-CEMENTO	BLOQUE DE CONCRETO
Masa volumétrica (Kg/m ³)	1800	1620	855	2300
Conductividad térmica (W/m °C)	0,72	0,49	0,383	1,08
Calor específico (J/Kg °C)	829	1240	1573	920
Difusividad térmica (m ² /s)	1,7 x 10 ⁻³	1,7 x 10 ⁻⁴	1.02 x 10 ⁻³	1,84 x 10 ⁻³
Retraso Térmico (hrs)	4 hrs 38'	6 hrs 32'	6 hrs. 28'	4hrs. 31'
Amortiguamiento térmico (%)	30	18	18	30
Resistencia Térmica (m ² °C/W)	0.208	0.306	0,391	0,138

La simulación del comportamiento térmico del material “arena sílice-lodo de papel”, en el prototipo de una vivienda local se realizó utilizando el SUNCODE, del programa SERI/RES, diseñado para *Solar Energy Research Institute* (SERI), citado por [25]. Los valores encontrados en la vivienda fueron altamente favorables para el nuevo material investigado con respecto a los que se obtuvieron con otros elementos de materiales tradicionales (bloques, ladrillos, y adobe). Los trabajos merecieron el reconocimiento y apoyo económico de la Comisión Nacional de Ciencia y Técnica de México [CONACyT] en 1998.

Caso d: Cenizas de residuos de la producción de aceite *Elaeis* en Uige, Angola

De la fruta de la palma africana *Elaeis guineensis*, originaria de África occidental, se obtiene el tipo de aceite *Elaeis*, que ocupa el segundo lugar dentro de la fabricación mundial de aceites, después del de soja. En el año 2010 la producción de aceite de palma a nivel mundial fue de 48 000 millones de toneladas. Un primer efecto negativo de este mega-cultivo extensivo es la seria contaminación que provoca a causa del uso de fertilizantes e insecticidas que ocasionan deforestación, pérdida de bosques tropicales y el consecuente perjuicio de la biodiversidad del territorio. [31] La deposición de grandes cantidades de desperdicios sólidos resultantes de la producción agroindustrial de aceite *Elaeis* genera vertederos con efectos ecológicos invasivos. Por ello, en algunos países, aunque parte de los residuos de cusco son reutilizados como relleno para sustrato de viales y otros pocos usos; normalmente se queman como combustible para producir vapor, práctica nociva al medio ambiente que demanda el desarrollo de tratamientos ecológicos para mitigar el efecto contaminante que se produce a la atmósfera por la calcinación.

Este problema, relevante por su magnitud, también se observa en el territorio en el que se realizó la presente investigación, donde se produjeron alrededor de 600 mil toneladas de cuesco de palma africana en 2013, y 589 mil en 2011, lo que indicaba la disponibilidad de un elevado potencial existente de ese tipo de residuos. Un estudio socioeconómico reflejó el predominio de viviendas construidas con materiales precarios en la región y la necesidad de disponer de materiales económicos para la población de escasos ingresos.

Por ello, en la tesis doctoral elaborada por Jorge Rufino [33] bajo la conducción científica del autor del presente trabajo, a partir del análisis realizado sobre antecedentes de la utilización tradicional de residuos en Angola (Tabla 06)], se investigaron las características de los residuos de la producción agroindustrial de aceite *Elaeis* (Figura 13) para determinar las posibilidades de utilizarlos en la producción de materiales para la construcción de viviendas. En particular, se investigó la capacidad potencial de sus cenizas como ingrediente para generar reacciones puzolánicas en la mezcla. [34]. De hecho, el uso de cenizas de distintos residuos como materiales de construcción, ha sido una práctica extendida en muchos países (Tabla 07), según referencias de fuentes internacionales. [32]



Figura 13: Cuesco de Palma Africana.

Tabla 06: Resultado de la exploración de posibles residuos disponibles en Uige, Angola [33]

NÚMERO	MATERIAL	SITUACIÓN ACTUAL	SITUACIÓN ANTERIOR
1	Caña de azúcar	Actualmente aún se usa para las coberturas	Se usaban las fibras vegetales como cobertura (<i>Capim</i>)
2	Suelos (arenosos, arcillosos,)	Se usa bastante en algunas zonas de implantación de frijoles	Tuvo gran aplicación
3	Capim (Fibras vegetales)	Existe mucho <i>Capim</i> en el municipio.	Siempre hubo disponibilidad para usarlo en las coberturas
4	Sisal	Existen actualmente muy pocas plantaciones, aunque el suelo es apropiado para su expansión	Nunca se expandió.
5	Madera	Existe mucha madera que se utiliza para hacer puertas, techos y ventanas	Existía en el pasado y se utilizó mucho
6	Café	Hay actualmente poca producción de café.	Había bastante producción de café, pero los residuos no se aprovechaban
7	Coco	No existe en la región	Tampoco existió
8	Cal	No existe	Se hicieron algunas explotaciones, pero se detuvieron con la guerra

Tabla 07: Reportes de utilización de cenizas de residuos de diverso origen para materiales de construcción en diversos países, según Natalia Fuentes *et. al.* [07]

TIPOS DE CENIZAS	LUGARES
Ceniza de cáscara de arroz	España, Perú, Argentina, Cuba y Colombia
Ceniza volante	Colombia y España
Ceniza de rastrojo de maíz	España
Cenizas volantes y piedra pómez	Colombia
Cenizas de hojas de maíz, cascarilla de arroz y bagazo de caña	Venezuela
Cenizas de coco y pino	Inglaterra
Cenizas de centrales térmicas, cascarilla de arroz	España
Ceniza de bagazo y hoja de caña de azúcar	Cuba

En este caso las cenizas no generaban vertederos de residuos, sino que eran una consecuencia de ellos, pero podían ser aprovechadas con un uso social. Se precisó la composición química de la

ceniza del cuesco de palma africana calcinada a diferentes temperaturas (Tabla 08), y se determinó la reactividad puzolánica aplicando la norma europea EN: 450 (equivalente a la ASTM C111 y a la norma cubana NC 54190:00 [8]). (Figura 14) Los resultados demostraron algunas diferencias de su grado de reactividad en función de la temperatura de calcinación, sin embargo el análisis del consumo de CaO demostró un nivel de reactividad muy por encima de lo estipulado por la norma empleada. (150 g/g).

Tabla 08: Composición química del cuesco de la palma africana a diferentes temperaturas de calcinación. [32]

COMPOSICIÓN	a 600 °C	a 700 °C	a 800 °C	DS
SiO ₂	64,8	66,2	66,5	0,283
Al ₂ O ₂	6,3	5,7	5,5	0,424
Fe ₂ O ₃	2	2,5	2,2	0,252
CaO	10,1	10,6	10,4	0,141
K ₂ O	3,5	3,1	2,8	0,351
MgO	3,55	3,4	3,3	0,126
SO ₂	1,2	1,35	1,3	0,076
Na ₂ O	0,6	0,52	0,49	0,057
Carbón	1,35	1,3	1,2	0,076
PPI	3,5	3,6	3,8	0,153
Σ Oxidos principales	73,1	74,4	72,2	0,569

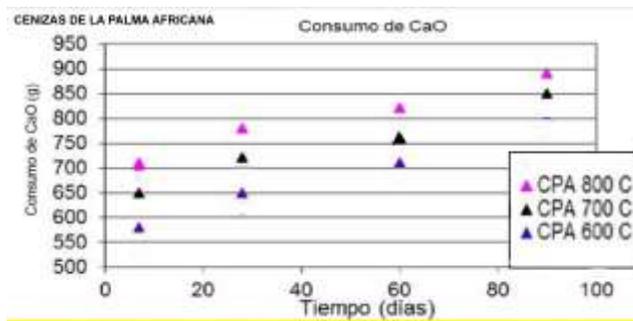


Figura 14: Resultado del análisis de reactividad puzolánica realizado a la ceniza de palma africana obtenida con diferentes grados de temperatura de incineración, con relación al consumo de CaO. Foto: [23]



Figura 15: Probetas con mezcla de ceniza de palma Elaeis, cal y suelo local, en proceso de curado húmedo, previamente a su ensayo en el laboratorio. Foto: [33]

Se realizaron ensayos de laboratorio a series estadísticas de probetas que utilizaban a la mezcla de cal combinada con la ceniza del cuesco de la palma africana como agente estabilizador del suelo de la localidad. (Figura 15) Los resultados arrojaron cualidades aceptables para su elaborar bloques de construcción para viviendas uniplanta.

Las ventajas mecánicas, ecológicas y económicas encontradas con el uso de la cal y ceniza-de-cuesco-de-palma-africana, fueron favorables con relación

a los obtenidos con otros aglomerantes y agentes estabilizantes en la región, así como con respecto a materiales de consumo actual en la construcción. [33].

Posteriormente se incluyeron cenizas de un desecho adicional en la mezcla, en este caso: el bagazo de caña procedente de la producción de azúcar, cuyo volumen alcanza una considerable

magnitud en Uige, que sobrepasaba las 937,000 toneladas. (Tabla 09) De tal modo, se integró la ceniza del bagazo a la mezcla compuesta por cal apagada, ceniza de cuesco y suelo local. Aunque la utilización de ambos tipos de cenizas no contribuía a mitigar la deposición de los residuos en vertederos, ni a evitar la emisión de CO₂ a la atmósfera debido a su calcinación, sí posibilitaría un importante beneficio social y económico para la comunidad por su nuevo uso.

Tabla 09: Magnitud anual de principales desechos agrícolas que se producen en Uige. [32]

RESIDUOS AGRÍCOLAS	DISPONIBILIDAD EN UIGE
Bagazo de caña de azúcar	937,000 toneladas
Cuesco de palma africana	589,000 toneladas
Cascarilla de café	25,000 toneladas
Cocos	80,000 toneladas
Cáscara de arroz	Producción pequeña

Como en el caso anterior con la ceniza de cuesco, se caracterizó la composición química de las cenizas del bagazo de caña de azúcar, (Tabla 10) y se le determinó su capacidad reactiva con la cal para formar compuestos estabilizadores (aglomerantes) de carácter puzolánico en las mezclas según lo establecido por la norma europea EN:450.

Tabla 10: Composición química del bagazo de la caña de azúcar calcinado a diferentes temperaturas. [32]

COMPOSICIÓN	a 600 °C	a 700 °C	a 800 °C	DS
SiO ₂	63,7	63,3	64,5	0,611
Al ₂ O ₂	3,3	3,5	3,55	0,132
Fe ₂ O ₃	3,8	4,2	3,2	0,503
CaO	11,5	11,3	11,7	0,200
K ₂ O	3,3	3,1	3,6	0,252
MgO	3,6	3,1	3,3	0,262
SO ₂	1,5	1,8	1,7	0,153
Na ₂ O	0,45	0,4	0,38	0,036
Carbón	1,6	1,46	1,4	0,103
PPI	4,2	4,7	4,6	0,265
Σ Oxidos principales	70,8	71	71,25	0,225

Los resultados de resistencia a compresión correspondientes a diversas dosificaciones de los componentes de la mezcla de suelo local con aglomerante cal + puzolana entre 5 % y 17 % de cal, según diferentes tiempos de curado, arrojaron valores satisfactorios. (Figura 16) Los valores de resistencia a la compresión obtenidos con la mezcla compuesta según diversas proporciones de las sustancias estabilizantes, fueron relativamente altos. Igualmente satisfactorios fueron los ensayos del comportamiento bajo condiciones de intemperie (Tabla 11)

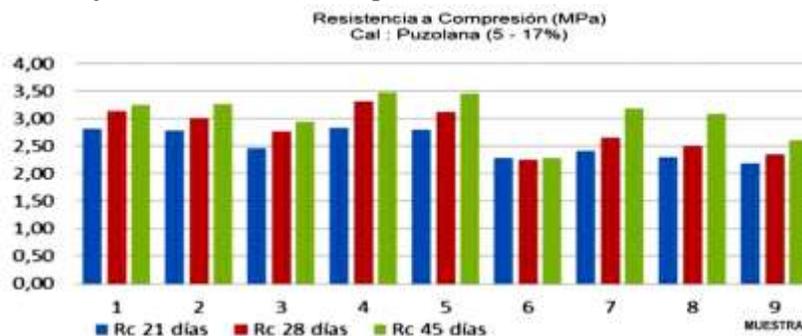


Figura 16: Resistencia comparativa a la compresión de muestras con cal-puzolana como estabilizador, según diferentes tiempos de curado. Foto: [32]

TABLA 11: Resultados cualitativos del ensayo del goteo.[23]

TRATAMIENTO	DOSIFICACIÓN	EVALUACIÓN CUALITATIVA
1	17% Cal + puzolana	E
2	5% Cal	R
3	15% Cal + puzolana	B
4	5% Cal	M
5	0% Estabiliz.	M

Discusión

Los tipos de residuos analizados fueron:

- Hidróxido de Calcio proveniente de la producción de gas acetileno
- Arcilla calcinada triturada residual procedente de tejares inactivos.
- Lodo de papel originado en una planta de reciclado del papel.
- Particulado volátil de mineral solidificado derivado de emisiones geotérmicas.
- Cenizas de cuesco residual de la producción agroindustrial de aceite Elaeis.
- Cenizas del bagazo residual de la producción de azúcar de caña.

El propósito consistió en verificar la posibilidad de ampliar las perspectivas de utilizar como ingredientes de materiales de construcción, a un mayor número y diversidad de residuos industriales adicionales a la mayoría de los ya tradicionalmente usados, (Tabla 12) principalmente si eran procedentes de vertederos ecológicamente invasivos.

Tabla 12: Sustancias estabilizantes usuales de diverso origen [32]

NATURALES	MANUFACTURADAS	% DE ADICIÓN A LA MEZCLA
Arena y arcilla	Cal	3 a 4 %
Paja y fibras de plantas	Cemento Portland	5 a 10 %
Jugos de plantas (savia látex)	Silicato de sodio	1 a 3 %
Cenizas de cáscara de arroz	Asfalto	2 a 5 %
Cenizas de paja y bagazo de caña	Puzolanas	≥ 15 %
Excremento de animales	Melaza	≥ 5 %
Otros productos de animales	Sueros (caseína)	≥ 4 %

Los residuos que fueron seleccionados eran diferentes con relación a: su naturaleza; composición química; función en las mezclas; efecto nocivo ocasionado; apariencia física; material de origen; tecnologías de obtención; tecnologías de elaboración de las mezclas; así como países y lugares de generación. También eran disímiles los tipos de vertederos seleccionados; localización geográfica; extensión; efecto invasivo; repercusión ambiental; daño al paisaje; nocividad al medio ambiente y a la salud humana así como las formas de control y mitigación que se les aplicaban. En todos los casos la tasa de deposición y su volumen eran suficientes para considerarlos como posibles fuentes de obtención de materia prima residual.

Es conocido que en dependencia del tipo y características potenciales de los residuos, estos pueden ser utilizados como agentes reactivos aglomerantes, como materiales aglomerados, o con funciones combinadas en los materiales de construcción. El lodo de papel, por ejemplo, participaba como material aglomerado en el cuerpo volumétrico de las mezclas. El Hidróxido de Calcio procedente de la producción de gas acetileno, se utilizaba por su capacidad de reacción con las puzolanas en presencia de humedad. El resto de los residuos investigados obraban como materiales puzolánicos tradicionales, de distinto origen, aunque en el caso de la arena sílice se podía utilizar indistintamente como agente aglomerante o material aglomerado. Por ello, resultó importante

verificar la capacidad reactiva de la arena sílice, así como de las cenizas de cuesco de palma y de bagazo de caña, con respecto a la cal, para verificar sus posibilidades de utilización como componentes puzolánicos con efectos estabilizantes, con la función de cohesionar las mezclas, con valores positivos.

Las cualidades mecánicas y físicas de las mezclas con proporciones idóneas de sus componentes, obtuvieron resultados satisfactorios en los ensayos. Cumplían con los requisitos establecidos en las normativas internacionales y locales del lugar. Adicionalmente presentaron cualidades aceptables en cuanto al envejecimiento, impacto, punzonamiento, adherencia y una parte de ellas en cuanto a la absorción de agua y la ascensión capilar. Si bien las mezclas con los residuos procedentes de Baja California, (principalmente el lodo de papel), mostraron cierta vulnerabilidad en cuanto al comportamiento ante estos dos últimos ensayos, no obstante este inconveniente resultaba posible de ser controlado con aplicación de aditivos en las mezclas, tratamientos superficiales hidro-repelentes, revocos con morteros hidrófugos o con la aplicación de sustancias hidro-selladoras. Esta debilidad se compensaba con la excelente capacidad termo-aislante que los residuos le introducían a las mezclas, especialmente importante para su uso bajo el clima cálido-seco extremo de la región.

El riesgo de efectos dañinos al ambiente y la potencial nocividad a la salud tanto por parte de los residuos como de sus vertederos de origen, requirió la atención minuciosa para descartar posibles riesgos derivados de los residuos e impurezas, como resultado de los procesos de elaboración de las mezclas y elementos constructivos, o asociados a su ciclo de uso. [35]. Se constató la importancia de profundizar en este aspecto, y con mayor énfasis en aquellos casos que evidenciaron algún inconveniente. Al respecto, en fuentes bibliográficas consultadas son identificados los tipos de sustancias residuales no admisibles (Tabla 13), se indican las combinaciones potencialmente peligrosas (Tabla 14) y se enumeran las sustancias y materiales peligrosos. [17] [18] [36]

Tabla 13: Residuos no admisibles, según [18]

• Residuos líquidos.
• Residuos explosivos, corrosivos oxidantes, fácilmente inflamables o inflamables en condición de vertido.
• Materiales radioactivos.
• Gases comprimidos.
• Residuos infecciosos según lo regulado.
• Neumáticos enteros usados, menos los que protegen límites del vertedero.
• Cualquier residuo que no cumpla con los criterios de admisión establecidos.

Tabla 14: Rangos de admisibilidad límite de la presencia de algunos elementos químicos en residuos que se vierten en los vertederos según [03]

COMPONENTE (L/S = 10 L/KG)	RESIDUOS INERTES	RESIDUOS NO PELIGROSOS	RESIDUOS PELIGROSOS
As	0,5 mg/kg	2 mg/kg	25 mg/kg
Ba	20 mg/kg	100 mg/kg	300 mg/kg
Cd	0,04 mg/kg	1 mg/kg	5 mg/kg
Hg	0,01 mg/kg	0,2 mg/kg	2 mg/kg
Pb	0,5 mg/kg	10 mg/kg	50 mg/kg
Cloruros	800 mg/kg	15 000 mg/kg	25 000 mg/kg
Sulfatos	1000 mg/kg	20 000 mg/kg	25 000 mg/kg
COT	30 000 mg/kg	5 %	6%

Se hizo evidente que los residuos de origen orgánico seleccionados, -siempre que no intervinieran procesos químicos complejos en su producción-, presentaban menos riesgo de nocividad que los de origen industrial, y su efecto ecológico negativo sobre el medio ambiente se

producía fundamentalmente a causa de los procesos de calcinación a que previamente fueron sometidos los residuos orgánicos, como el caso de las cenizas.

Los residuos más críticos entre los seleccionados, debido a la probabilidad de clasificar dentro de categorías de riesgo no admisibles para su utilización en materiales de construcción, resultaron ser: el hidróxido de calcio residual de los procesos de producción de gas acetileno, así como el mineral particulado y volátil derivado de la condensación y evaporación de las emisiones geotérmicas de Cerro Prieto, denominado “arena sílice” o simplemente “sílice”.

En las muestras procedentes del vertedero en Río Verde, junto a las usuales impurezas de fosfatos acompañantes y fosfina derivada, las trazas de compuestos de azufre encontradas cuestionaron que se implementara su utilización en ese momento. El vertedero fue desactivado hace pocos años, no obstante, aún no han sido regeneradas las áreas naturales degradadas por la antigua deposición.

El nivel de impacto ambiental y toxicidad del vertedero de Cerro Prieto, a pesar de las diversas imputaciones de nocividad que se le ha considerado responsable, [29] [30] [35], ello no ha sido aún reconocido por los estudios ambientales oficialmente realizados, [36] y hay quienes lo califican como una “industria verde”, de tipo inerte. [37] La composición química del mineral no excedía los límites admitidos por las normas, [9] pero los resultados de investigaciones de laboratorios independientes evidenciaron la presencia en algunos de los pozos, de trazas de sustancias tóxicas acompañantes, [12] lo que cuestionó su implementación en ese momento.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) [36] [37] ha declarado que posee un departamento especializado para segregar, controlar y neutralizar las sustancias perjudiciales presentes en los vertederos a su cargo. Está pendiente aún hoy profundizar en los estudios de impacto ambiental dirigidos a esclarecer definitivamente los referidos aspectos [29] de lo cual dependería el uso y generalización de la arena sílice como posible material de construcción. Mientras, nuevas investigaciones¹⁴ se han realizado para elaborar elementos constructivos de la vivienda con estos residuos. (Figura 17)



Figura 17: Muro de bloques-traba de excelentes propiedades resistentes y térmicas, elaborados con residuos de arena sílice y lodo de papel, desarrollados por investigadores de la UABC y colaboradores de esa universidad y del ISPJAE, [Foto: cortesía personal]

Se hizo evidente en el caso de residuos procedentes de vertederos invasivos, la conveniencia de que el análisis de inocuidad deba realizarse no solo al residuo, sino que sea también extensivo a las sustancias acompañantes, y que las muestras sean representativas de todas las áreas del vertedero, y no solo de una de sus partes.

En cuanto al “lodo de papel”, el análisis de inocuidad consideró que aunque este se extraía de una solución líquida blanqueadora a base de cloro, ello podría ser neutralizado, y dejar inocuo al residuo resultante, sin probabilidad de riesgo de efectos nocivos, al disponerse de tecnología adecuada para ello. En el caso de las mezclas elaboradas con ese desecho, se aplicaron procedimientos tecnológicos diferentes a los empleados tradicionalmente para la elaboración de otros materiales de construcción, con el fin de conformar especímenes de geometría regular, uniforme y de calidad.

Adicionalmente, a la mezcla con lodo de papel, así como a la de sus combinaciones con arena sílice, se les sometió a una exhaustiva investigación de las propiedades térmicas. Ello se realizó debido a las características del clima desértico cálido-seco extremo de la localidad donde se producía el lodo de papel, pues en esa zona se han registrado en diversas ocasiones las temperaturas más cálidas del planeta, por lo que un material de construcción con las excelentes propiedades térmicas de las referidas mezclas resultaba un atractivo adicional para su implementación productiva como solución a un importante problema térmico ambiental de la zona, además de disminuir el consumo de celulosa, el gasto de transportación para la deposición del desecho y contribuir a mitigar sus vertederos. Sin embargo, si se le agregaba sílice a la mezcla, se le transfería también la incertidumbre sobre la posible nocividad de ese componente. [9]

En el desarrollo de las investigaciones se detectó como condición desfavorable, que los materiales de construcción producidos con residuos en general suscitan suspicacia por parte de la población acerca de la idoneidad para ser utilizados, particularmente si es conocido que proceden de vertederos locales cercanos. Igualmente, son asociados erróneamente a materiales de bajo estatus social, lo cual desanima su implementación y desestimula su producción, aspectos que deben formar parte de los análisis de factibilidad y de mercado que se realicen.

Conclusiones

Se encontró que varios de los residuos industriales seleccionados en este trabajo resultaron aptos para ser utilizados en la elaboración de materiales de construcción, de lo que se deriva la afirmación de que sí sería posible ampliar la cantidad y variedad de residuos que pudieran ser utilizados con ese fin y contribuir así a reducir vertederos ecológicamente invasivos. Aunque todos los analizados cumplieran con los requisitos físico-mecánicos, algunos se recusaron por riesgos a la salud o de nocividad ambiental.

Se concordó en que las peculiaridades de algunos tipos de residuos exigen aplicar ciertas investigaciones específicas *ad hoc*, diferenciadas o adicionales a las requeridas por los otros. Aunque generalmente se considera que la validez de un material de construcción depende principalmente de que satisfaga determinadas propiedades físico-resistentes, en los casos de materiales que incorporen residuos o desechos industriales eso no basta, y es imprescindible que se satisfagan con prioridad otras cualidades. En los casos investigados, al tratarse de residuos de vertederos ecológicamente invasivos, fue imprescindible realizar análisis adicionales de tipo ambientalista, contextual y socioeconómico cuyos resultados debieron cumplir con los siguientes criterios:

Inocuidad: Que las mezclas de materiales elaboradas con residuos industriales así como sus impurezas, no excedan los límites nocivos a la salud y/o al medio ambiente. Los residuos peligrosos, no son admisibles para usarlos en materiales de construcción.

Admisibilidad: Que los vertederos de los residuos y sustancias acompañantes, sean inertes, no peligrosos para la manipulación (agentes radioactivos, biológicos, inflamables, explosivos, corrosivos, etc.), o que en todo caso, pueda ser debidamente controlada y neutralizada su nocividad. Los residuos procedentes de vertederos peligrosos no son convenientes para su uso en construcción. El análisis y monitoreo de muestras de los vertederos extensivos debe abarcar la mayor cantidad de las partes de su área y no solo incluir muestras exploratorias representativas.

Factibilidad tecnológica: Que sea tecnológicamente factible la elaboración, curado y manipulación de las mezclas, así como la producción de elementos constructivos, o en todo caso, definir procedimientos específicos y técnicas idóneas para su procesamiento, según el tipo de mezcla, material y elemento constructivo que se trate.

Adecuación a las condiciones locales: Los materiales obtenidos deben ser apropiados para las condiciones climáticas de la zona, régimen de uso, tipo de construcciones a que sean destinados y otras características locales del territorio.

Factibilidad económica: Que tenga suficiente demanda potencial el nuevo material y sea económicamente favorable su implementación productiva y comercial.

Socialmente beneficioso: Que su aplicación sea socialmente aceptada, y su implementación apropiada y beneficiosa para la comunidad que lo producirá y dará uso.

Referencias bibliográficas

- [1] Sáez A, Urdaneta JA. Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. Omnia [Internet]. 2014 [Consultado: 22 de noviembre 2017]; 20(3 septiembre–diciembre):[121–35 pp.]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/html/737/73737091009/>.
- [2] Agredo GA. Residuos industriales se convierten en materiales para construcción. Manizales. Universidad Nacional de Colombia [Internet]. 2017 [Consultado: 22 de noviembre 2017]: Disponible en: <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/residuos-industriales-se-convierten-en-materiales-para-construccion.html>.
- [3] Fuentes N. Evaluación del uso de cenizas industriales como agregado orgánico en bloques de construcción. En: Libro de Ponencias: 17 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, evento 3er Congreso Internacional Medio Ambiente Construido y Desarrollo Sustentable. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría, Cujae; 2014.
- [4] Chávez A. Materiales de construcción a partir de residuos industriales. Greenit Innovation Tech. Veracruz, México: Actualidad Noticia. [Internet] 2016. [Consultado: 22 de noviembre 2017]: Disponible en: <https://gestoresderesiduos.org/noticias/materiales-de-construccion-a-partir-de-residuos-industriales>.
- [5] Ku-Chuc V. Cruz JC. Escobar-Morales B. Incorporation of crushed recycled glass to concrete and its effect on its compression strength. En: Libro de Ponencias: 17 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, evento 3er Congreso Internacional Medio Ambiente Construido y Desarrollo Sustentable. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría, Cujae; 2014.
- [6] Abilia 10 materiales de construcción ecológica. Arquitectura verde. [Homepage]. 2015 [Consultado: 19 de abril 2015]. Disponible en: <http://conciencia-sustentable.abilia.mx/10-materiales-de-construccion-ecologicos/>.
- [7] Ultimate Magazine. Los vertederos y los efectos nocivos en el medio ambiente. Ocio. [Homepage] 2015. [Consultado: 22 de noviembre 2017]. Disponible en: <https://www.ocio.net/estilo-de-vida/ecologismo/los-vertederos-y-los-efectos-nocivos-en-el-medio-ambiente/>.
- [8] Ruiz J. Gestión de residuos sólidos industriales. Departamento de Derecho ambiental Ferrere. [Internet]. 2013 [Consultado: 22 de noviembre 2017]. Disponible en: https://www.google.com/cu/search?dcr=0&source=hp&ei=r64VWtr3E6S2ggeNyKHIBA&q=desechos+solidos+industriales+pdf&oeq=Desechos+s%C3%B3lidos+industriales+&gs_l=psyab.1.6.0i19k1j0i22i30i19k1i9.4395.4395.0.9970.3.2.0.0.0.387.387.3-1.2.0....0...1c.2.64.psy-ab..1.2.780.6..35i39k1.394.Jze6Y7VtWtQ.
- [9] Orjuela D. Estudio comparativo de las normas relevantes a nivel internacional para la definición, clasificación, exclusión, desclasificación e identificación de residuos peligrosos. NOVA: Publicación Científica en Ciencias Biomédicas [Internet]. 2013 [Consultado: 6 de diciembre 2017]; 11(19 enero-junio):[73-92 pp.]. Disponible en: <http://web.b.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=2&sid=fe6ba5be-4819-4575-a676dc60ea64eae8%40pdcvsessmgr01&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#db=lth&AN=98203494>.
- [10] Frers C. Medidas para solucionar la contaminación industrial. Temas especiales [Internet]. 2009 [Consultado: 10 de noviembre 2017]. Disponible en: https://www.ecoport.net/temas-especiales/contaminacion/medidaspara_solucionar_la_contaminacion_industrial/.
- [11] Ramos R. Valorización de Residuos. Eco Medio Ambiente [Internet]. 2013 [Consultado: 10 de noviembre 2017]. Disponible en: <http://ecomedioambiente.com/medio-ambiente/valorizacion-residuos/>.
- [12] Quesada H, Salas JC, Romero LG. Manejo de desechos industriales peligrosos. Tecnología en Marcha. abril-junio 2007; 20(2): [11-21].

- [13] Altabella JE. Un programa reduce el impacto ambiental y económico de los residuos de construcción. Sinc. UJI [Homepage] 2013 [Consultado: 6 de diciembre 2017]. Disponible en: <http://www.agenciasinc.es/Noticias/Un-programa-reduce-el-impacto-ambiental-y-economico-de-los-residuos-de-construccion>.
- [14] Reyes DF, Cornejo YA. Estado del arte de la construcción con material reciclable. Creative Common. Universidad Católica de Colombia. Bogotá DC [Internet]. 2014 [Consultado: 6 de diciembre 2017]. Disponible en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>.
- [15] Ampa JK. Manejo de residuos sólidos y medio ambiente. Ecología [Internet]. 2012 [Consultado: 22 de noviembre 2017]. Disponible en: [http://www.monografias.com/trabajos94/manejo-residuos-solidos-y-medio-ambiente.shtml](http://www.monografias.com/trabajos94/manejo-residuos-solidos-y-medio-ambiente/manejo-residuos-solidos-y-medio-ambiente.shtml).
- [16] Caicedo EA, Mejía R, Gordillo M, Torres J. Reutilización de un residuo de la industria petrolera en la producción de elementos constructivos. Ingeniería y Universidad [Internet]. 2015 [Consultado: 27 de noviembre 2017]; 19(1):[135-54 pp.]. Disponible en: <http://web.b.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=1&sid=ee775d04-ece7-434d9220374fc655af90%40pdcsessmgr01&bdata=Jmxbhmc9ZXMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#AN=103316537&db=zbh>.
- [17] Residuos industriales. Ciencias de la tierra y del medio ambiente. [libro electrónico en Internet]. 2013 [Consultado: 10 de noviembre 2017]; Disponible en: <http://www4.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/13Residu/120ResInd.htm>.
- [18] Botamino I. Depósito de residuos en vertedero. Escuela de organización ambiental. EOI. [Internet] 2008. [Consultado: 22 de noviembre 2017]; Disponible en: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45615/componente45613.pdf.
- [19] Grupo Transmerquim. Carburo de calcio Hoja de datos de seguridad. Revisión N°3. GTM. [Homepage]. 2014 [Consultado: 27 de noviembre 2017]. Disponible en: <http://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0312sp.pdf>.
- [20] Guerrero JJ. Obtención de acetileno a partir de carburo de calcio. Química II. Universidad de Lambayeque. Perú [Internet]. 2015 [Consultado: 22 de noviembre 2017]. Disponible en: http://ing-ambiental-udl.blogspot.com/2016/04/obtencion-de-acetileno-partir-de_92.html.
- [21] New Jersey Department of Environmental Protection. Hoja informativa sobre sustancias peligrosas: Carburo de Calcio. [traducido] [Homepage] 2011 [Consultado: 22 de noviembre 2017]. Disponible en: <http://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0312sp.pdf>.
- [22] Aurelijus Z. Obtención de acetileno [Internet]. 2013 [Consultado: 22 de noviembre 2017]. Disponible en: <https://www.scribd.com/doc/143252445/Obtencion-de-Acetileno>.
- [23] Rufino J. Estudio de los deterioros y mejora de la sostenibilidad ambiental de las viviendas populares construidas en la región de Uíge, Angola. En: Libro de Ponencias: 17 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, evento 3er Congreso Internacional Medio Ambiente Construido y Desarrollo Sustentable. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría, Cujae; 2014.
- [24] Gomà-Camps. Lodos de depuradora de papelera reutilizados en la fabricación de ladrillos. Residuo=Recurso [Homepage]. 2014 [Consultado: 22 de noviembre 2017]. Disponible en: <http://www.residuorecurso.com/es/blog/2014/10/28/lodos-de-depuradora-de-papelera-reutilizados-en-la-fabricacion-de-ladrillos-2>.
- [25] Bojórquez G, Luna A, Gallegos R. Sílice y lodo de papel, uso de residuos industriales como agregados en un concreto ligero. Temas de ciencia y tecnología [Internet]. 2000 [Consultado: 22 de noviembre 2017]; 4(10 enero-abril): [3-9 pp.]. Disponible en: http://mmi.utm.mx/edi_anteriores/pdf/e1003.pdf.
- [26] Cabezas C. Nueva tecnología sustentable: Ladrillos con papel reciclado. Fuel Processing Technology ArchDaily [Internet]. 13 de enero de 2013 [Consultado: 22 de noviembre 2017]; 21(50): [1-5], Disponible en: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-226693/nueva-tecnologia-sustentable-ladrillos-con-papel-reciclado>.
- [27] Martínez C. Crean ladrillos con residuos de papel y lodos residuales. Universidad de Jaén. UJAEN. [Internet]. 2012 [Consultado 22 de noviembre de 2017]; Disponible en: <http://www.20minutos.es/noticia/1672948/0/ladrillos/residuos/papel/#xtor=AD-15&xts=467263>.
- [28] Martínez C. Ladrillos fabricados con residuos de papel. Fuel Processing Technology [Internet]. 2012 [Consultado: 22 de noviembre 2017]; 21:50 [2p.]. Disponible en: <http://www.elmundo.es/elmundo/2012/12/10/ciencia/1355137874.html>.
- [29] Ortuño G. Proyecto Cerro Prieto: el rescate de un volcán de la contaminación en Mexicali. FONDEA [Internet]. 2016 [Consultado: 14 de noviembre de 2017]. Disponible en: <http://www.animalpolitico.com/2016/08/rescatan-volcan-contaminado-planta-geotermica-la-cfe/>.
- [30] Law R. ¿Sabías que en Mexicali, solo la geotérmica de Cerro Prieto emite al medio ambiente 19 mil toneladas de CO₂, cada hora? Periodismo puntual [Internet]. 2017 [Consultado: 22 de noviembre

- 2017]: Disponible en: <https://periodismopuntual.wordpress.com/2017/10/23/sabias-que-en-mexicali-solo-la-geotermica-de-cerro-prieto-emite-al-medio-ambiente-19-mil-toneladas-de-co2-cada-hora/>.
- [31] Kucharz T. La palma africana en Colombia, Ecologistas en acción. Ecologistas [Internet]. 2015 mayo 23 [Consultado: 22 de noviembre de 2017];(44): [1-7]. Disponible en: <http://www.ecologistasenaccion.org/article17394.html>.
- [32] Fuentes N, Vizcaino L. Evaluación del uso de cenizas industriales como agregado en la elaboración de bloques de construcción. En: Libro de Ponencias: 17 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, evento 3er Congreso Internacional Medio Ambiente Construido y Desarrollo Sustentable. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae; 2014.
- [33] Rufino J. Selección de materiales, mezclas y tecnología de construcción con suelo estabilizado para mejorar la calidad de las viviendas construidas por la población del territorio de Uige en Angola [Doctoral]. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría; 2013.
- [34] Rufino J. Determinación de los problemas técnico- constructivos actuales que afectan la calidad y durabilidad de las viviendas de tierra en la provincia de Uige, Angola. Arquitectura y Urbanismo [Internet]. 2013 [Consultado: 6 de diciembre 2017]; 34(2):[27-36 p.]. ISSN 1815-5898. Disponible en: <http://rau.cujae.edu.cu/index.php/revistaau/article/view/253>.
- [35] Suárez S, Molina E. El desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente. Revista Cubana de Higiene y Epidemiología [Internet]. 2014 [Consultado: 6 de diciembre 2017]; 52(3):[357-63 pp.]. Disponible en: <http://web.a.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=18&sid=d81234af-0383-4d47-b315-50becdf3cbe8%40sessionmgr4006&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZTllaG9zdC1saXZI#AN=108590793&db=lth> y <http://scielo.sld.cu>.
- [36] López G. Análisis geográfico de la contaminación ambiental: La zona urbana de Mexicali, Baja California, México. Partes: 1, 2. México: Ecología. [Internet] 2013 [Consultado 22 de noviembre 2017]; Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos55/sitioscontaminados/sitioscontaminados.shtml#ixzz4zBSiknMj>
- [37] Comisión Federal de Electricidad. Manifestación de impacto ambiental. Modalidad particular. Proyecto geotermoeléctrico Cerro Prieto V. CFE. [Internet]. 2007 [Consultado: 22 de noviembre 2017]; Disponible en: <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/bc/estudios/2007/02BC2007E0001.pdf>.
- [38] Comisión Federal de Electricidad. Energía limpia y renovable. Fotos. CFE gob.mx [Homepage] 2013 [Consultado: 22 de noviembre 2017]. Disponible en: https://www.google.com/cu/search?q=cerro+prieto+geotermica&dcr=0&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=YeQK6eugy_IKVM%253A%252Cf3WjhVO9IXKvPM%252C_&usg=__tLl2VkcW6P3OG70lM_GHzYP2w%3D&sa=X&ved=0ahUKEwj1qdDbm_bXAhUG5yYKHVihBJsQ9QEIOjAC#imgrc=YeQK6eugy_IKVM:



Alfonso Alfonso González

Doctor en Ciencias Técnicas, Arquitecto, Profesor Titular Consultante. Facultad de Arquitectura; Universidad Tecnológica de La Habana, José A. Echeverría, La Habana, Cuba. Colegio Universitario San Gerónimo de La Habana, Universidad de La Habana, Cuba.

Email: alfonso@sangeronimo.ohc.cu; alfonsoalfonsog@gmail.com

¹ Trabajos conducidos en el CECAT en 1993 por A. Alfonso con la participación de tres diplomantes alemanes de la *Hochschule für Architektur und Bauwesen, HAB Weimar*.

² Con la participación de A. Alfonso, O. Echenique y G. Peterssen, de la Facultad de Arquitectura del ISPJAE para sustituir bloques huecos de hormigón para la construcción de viviendas en La Güinera, en La Habana.

³ A partir del proyecto arquitectónico, técnico y de organización de obra, elaborado por A. Alfonso, en 1993 se edificó en Cocosolo, con la participación directa de nueve estudiantes alemanes del Tropenbau de la HAB Weimar, un edificio de seis apartamentos con bloques de suelo local, bajo consumo de cemento, y cubierta de Tejas TEVI.

- ⁴ Tesis en la Universidad Mayor de San Simón, en Cochabamba, con proyecto y tecnología constructiva basada en paneles de materiales con desechos industriales elaborada por Buitrago y Sandoval bajo la asesoría de A Alfonso, como consultor de la Maestría en “Ciencias de la Construcción en Países en Desarrollo”, y la tutoría de J. Flores.
- ⁵ Universidades tales como la UMSS en Cochabamba; el ISPJAE en La Habana y la UABC en Mexicali y Ensenada, Baja California.
- ⁶ Al respecto se desarrolló una Investigación experimental entre 1991 y 1992 por el autor del presente trabajo y colaboradores, para explorar el posible uso del residuo de la Planta de gas acetileno de Río Verde, en La Habana, como material de construcción de viviendas, la cual contó con el apoyo del Centro de Estudios de la Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT) y el patrocinio de la ONG suiza “SOFONIA”.
- ⁷ Incluyó pruebas para determinar la resistencia de bloques secos y húmedos a la compresión, al impacto, al desgaste; la determinación de absorción de agua en lapsos diversos, y el envejecimiento.
- ⁸ En los residuos de la producción de gas acetileno se encuentra generalmente la presencia de fosfina, sustancia con cierto olor a ajo que se desdobra del fosforo cálcico que acompaña como impureza al hidróxido de calcio derivado de la reacción. En el caso del residuo de Río verde también fueron encontradas trazas de azufre.
- ⁹ Con la participación como colaboradores, de Amat Barbosa, especialista químico del CECAT, y de los investigadores de alto nivel de la UABC: Gonzalo Bojórquez, Aníbal Luna, y Ricardo Gallegos.
- ¹⁰ Participaron Arq. Gonzalo Bojórquez, Arq. Aníbal Luna, Ing. Ricardo Gallegos, Ing. Amat Barbosa y diplomantes de Arquitectura de la UABC.
- ¹¹ En los análisis de laboratorio se encontraron evidencias de cianuro en algunos de los pozos, entre otras impurezas lo que explica las obstrucciones ocasionadas al desarrollo de la investigación.
- ¹² Desarrollada por los investigadores de la UABC: Ricardo Gallegos, Gonzalo Bojórquez y Aníbal Luna.[25]
- ¹³ Se utilizó cemento puzolánico, marca California (ASTM C59292) y cal hidratada marca PIMACAL.[27]
- ¹⁴ Con la, autoría Ricardo Gallegos, Gonzalo Bojórquez, Aníbal Luna; y la participación por la UABC, Ramona Alicia Romero, María Corral, Lorena Cubillas, María Socorro Romero; Abel Cota Ibarra; Rafael Salcido, Ricardo Cota. Por el ISPJAE y el CECAT, Alfonso Alfonso y Enrique Amat.

