

Nuevas alternativas en la construcción: botellas PET con relleno de tierra*

Daniel Ruiz Valencia

Cecilia López Pérez

Eliana Cortes

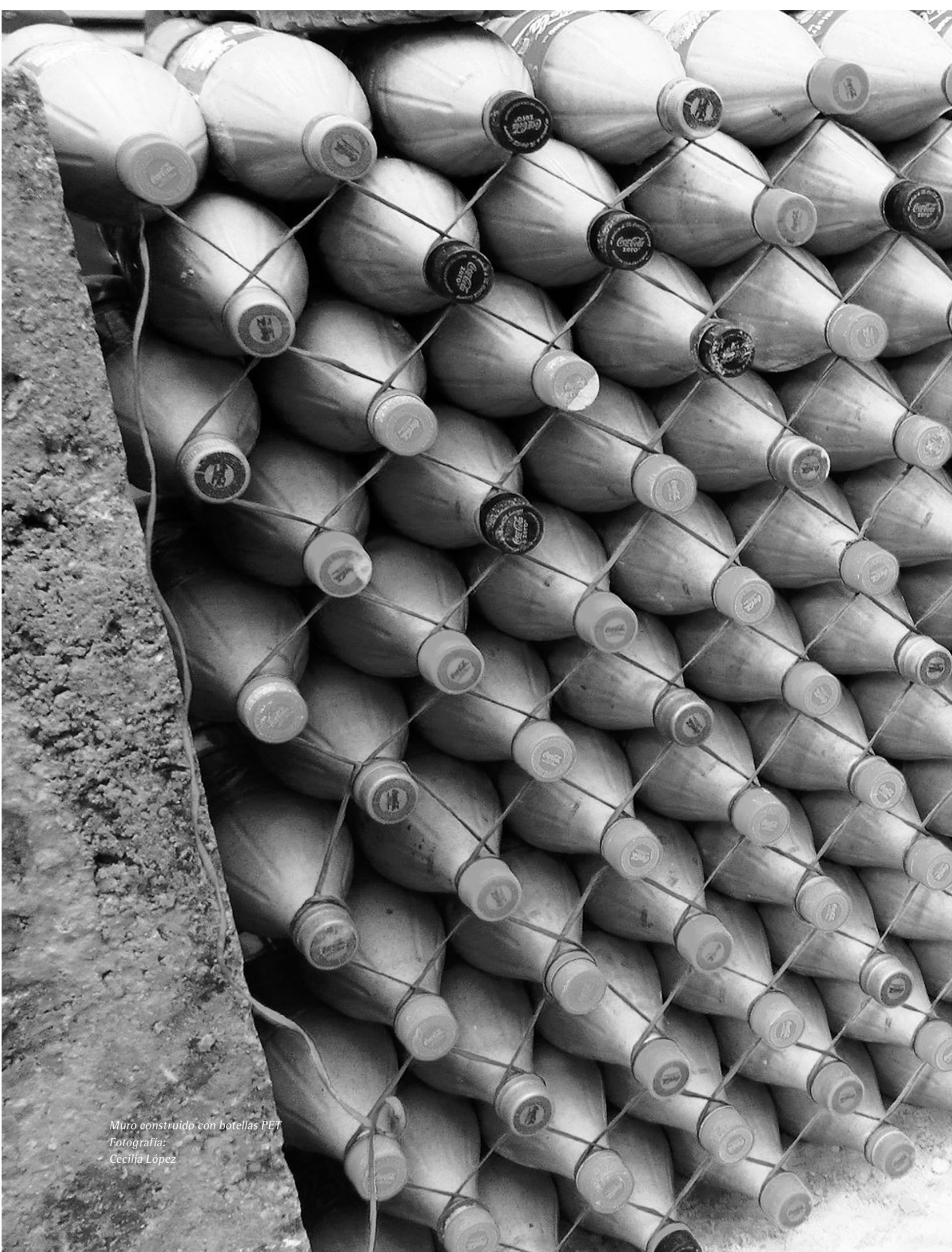
Andreas Froese

Uno de los problemas de mayor relevancia para la humanidad en el último siglo es el calentamiento global que ha producido un cambio climático de manera acelerada y anormal, a tal grado que afecta la supervivencia de la especie. Hay dos factores que tienen alta incidencia en la producción del fenómeno. El primero, es el aumento de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) originados en las ciudades desarrolladas o en proceso de industrialización, que suponen una gran demanda de bienes de consumo y por ende, una gran acumulación de residuos sólidos y basura. Esta basura está formada principalmente por plásticos, cartones, papel, restos de comida, madera, cenizas, envases de cristal, metal y hojalata. De acuerdo a los reportes de la Alcaldía de Bogotá, cada día se recoge en la ciudad un promedio de 5.800 toneladas de desperdicios que se arrojan al relleno sanitario Doña Juana, en el suroriente de la ciudad (*El Tiempo*, 2007). Se considera que los plásticos representan el 40% del total de la basura acumulada, que adicionalmente demora varios lustros en degradarse con el consiguiente daño ecológico que esto representa.

El segundo factor, son las emisiones producidas por los materiales empleados en la construcción. La producción de materiales como el acero, el concreto y el ladrillo implica el consumo de cantidades representativas de energía, lo que a su vez contribuye al deterioro ambiental, por lo cual se busca que los nuevos materiales usados en las edificaciones tengan un bajo impacto ambiental y contribuyan así a disminuir el calentamiento global.

Por otra parte, la ONU ha alertado a los gobiernos sobre el agravamiento de la escasez de vivienda en las ciudades que se presentará en los próximos 25 años. Un informe de ONU-HABITAT, determinó que el 40% de la población urbana necesitará viviendas e infraestructuras de servicios básicos de aquí al 2030. El estudio advirtió que esta necesidad se sumará a la ya existente demanda de 2.000 millones de personas, que actualmente comprenden el 50% de la población del planeta (ONU-HABITAT, 2010). Sin embargo dar solución por parte de los gobiernos a este problema, presenta su mayor dificultad en la financiación de proyectos masivos de bajo costo. De acuerdo a un estudio realizado por el Banco de la República de Colombia, sólo entre el 10% y el 15% obtienen préstamos para compra de vivienda, la modalidad de vivienda 'efectivo' estaba alrededor del 41% al 52% a finales de la década pasada (Clavijo, Michel & Santiago, 2004).

* Cómo citar este artículo: Ruiz, D., López, C., Cortes, E., Froese, A. (2012). Nueva alternativa de construcción: Botellas PET con relleno de tierra. En: Apuntes 25 (2): 292 - 303.



Muro construido con botellas PET
Fotografía:
Cecilia López

Artículo de investigación

El artículo plantea la necesidad de desarrollar un estudio de comportamiento técnico-mecánico, como base del análisis sísmico resistente, sobre un sistema constructivo que actualmente ha empezado a tomar gran auge en el mundo, como una técnica constructiva para viviendas económicas y construcciones post desastre, llamado construcciones con botellas PET.

Recepción: 10 de agosto de 2012

Acceptación: 22 de septiembre de 2012

Nuevas alternativas en la construcción: botellas pet con relleno de tierra

New alternatives in construction: earth filled pet bottles

Construção nova alternativa: garrafas pet com terra fill

Daniel Ruiz Valencia

daniel.ruiz@javeriana.edu.co

Pontificia Universidad Javeriana

Ingeniero Civil y Magíster en Ciencias de la Universidad de los Andes. Jefe del Laboratorio de Pruebas y Ensayos. Profesor asociado e investigador del grupo de estructuras y construcción del departamento de Ingeniería Civil.

Cecilia López Pérez

lopez.c@javeriana.edu.co

Pontificia Universidad Javeriana

Arquitecta y Magíster en Restauración de la Pontificia Universidad Javeriana. Profesora asistente, directora del grupo GRIME de la Facultad de Arquitectura y Diseño.

Eliana Cortes

eliana.cortes@javeriana.edu.co

Pontificia Universidad Javeriana

Arquitecta y Magíster en Construcción de la Universidad Nacional de Colombia. Integrante del grupo de investigación GRIME en la Línea Nuevas Tecnologías Constructivas en Arquitectura.

Andreas Froese

ecotecoluciones@gmail.com

Pontificia Universidad Javeriana

Ecologista dedicado a la bioconstrucción y al ecodiseño. Se desempeña como consultor internacional y viaja por diferentes partes del mundo multiplicando su saber y experiencia.

RESUMEN

Dos de los mayores problemas de la humanidad son la falta de vivienda y la acumulación de los residuos sólidos y basura que al final trae como consecuencia problemas ambientales. Dentro de estos residuos sólidos están los plásticos como las botellas PET (envases de bebidas gaseosas por ejemplo). Para afrontar ambos problemas, desde el año 2001 la empresa Eco-Tec Soluciones ha sido pionera en la construcción de casas y tanques de almacenamiento de agua con botellas PET llenas de tierra. Los grupos GRIME y Estructuras y Construcción de la Pontificia Universidad Javeriana, en asocio con Eco-Tec Soluciones, documentaron el proceso constructivo y realizaron pruebas piloto para evaluar la resistencia mecánica a la compresión de botellas rellenas. Asimismo hicieron pruebas piloto del comportamiento mecánico de muros de botellas rellenas con tierra ante cargas perpendiculares al plano del muro. Estos resultados y análisis se presentan en el presente documento.

El artículo presenta los principales avances del proyecto de investigación titulado "Construcción con botellas plásticas PET" desarrollado por los grupos: Estructuras de la Pontificia Universidad Javeriana y el Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras (GRIME). Los autores desean agradecer al Departamento de Arquitectura y al Laboratorio de Pruebas y Ensayos del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana por el apoyo brindado para el desarrollo de la investigación experimental.

Palabras Clave: Botellas PET, sistema constructivo, ensayos de materiales y estructuras.

ABSTRACT

Two of the main problems of mankind are the lack of housing and the accumulation of solid waste and garbage that ultimately brings environmental problems. Within this solid waste are plastics such as the PET bottles (for example soda bottles). In order to try to solve both problems, since 2001 Eco-Tec Soluciones has pioneered in the construction of houses and water storage structures with PET bottles filled with rammed earth. Groups GRIME and Estructuras y Construcción of the Pontificia Universidad Javeriana, associated with Eco-Tec Soluciones, documented the constructive process and performed tests to evaluate the mechanical resistance to compression forces of earth-filled PET bottles. Pilot tests were also carried out for the mechanical behavior of walls made with earth-filled PET bottles subjected to loads perpendicular to the plane of the wall. These results and analyses are presented in this paper.

The paper presents the main results of the research project "Construction with PET plastic bottles" developed by the Materials and Structures Research Group (GRIME) in conjunction with the Structures group of the Pontificia Universidad Javeriana. The authors wish to thank the Department of Architecture and Civil Engineering Laboratory at the Pontificia Universidad Javeriana for its support during the development of this research.

Keywords: PET bottles, constructive system, materials tests, structures tests.

RESUMO

Dois dos maiores problemas da humanidade são sem-abrigo e do acúmulo de resíduos sólidos e lixo que acaba resultando em problemas ambientais. Entre estes resíduos sólidos são plásticos, como garrafas de PET (garrafas de refrigerantes, por exemplo). Para resolver os dois problemas, desde 2001 a empresa Eco-Tec Solutions foi pioneira na construção de casas e tanques de armazenamento de água garrafas PET cheias de terra. Grupos de sujidade e Estructuras e Construção da Pontificia Universidad Javeriana, em associação com a Eco-Tec Solutions, documentando o processo de construção e pilotou para avaliar a resistência à compressão de garrafas cheias. Também piloto testou o comportamento mecânico de paredes de garrafas cheias com terra para cargas perpendiculares ao plano da parede. Finalmente avaliados versus comportamento da carga. Estes resultados e da análise são apresentados no presente documento.

O documento apresenta os principais resultados do projeto de pesquisa "Construção com garrafas de plástico PET", desenvolvido pelo grupo GRIME (Materials Research Group e estruturas). Os autores agradecem ao Departamento de Arquitetura e Laboratório de Engenharia Civil da Pontificia Universidade Javeriana de seu apoio para o desenvolvimento desta pesquisa.

Palavras-chave: garrafas PET, sistema de construção, testes de materiais e estruturas.

* Los descriptores y key words plus están normalizados por la Biblioteca General de la Pontificia Universidad Javeriana.

A este déficit de vivienda de las grandes ciudades se debe sumar el de sectores rurales afectados por fenómenos de desplazamiento y fenómenos naturales. La sola ola invernal de 2007 produjo el desbordamiento de los ríos Cauca y San Jorge, afectando a 33.000 familias constituidas por cerca de 165.000 personas, de las cuales 6.000 habitaron albergues temporales. Estas inundaciones destruyeron y averiaron viviendas, afectaron las infraestructuras viales y arrasaron hectáreas cultivadas de arroz, yuca, maíz y plátano (Osuna, 2007). Este número aumentó en el año 2010, generado por una nueva ola invernal que dejó cerca de un millón de personas damnificadas, afectando 515 poblaciones en 28 de los 32 departamentos de Colombia. Sobre el particular el gobierno colombiano manifestó que no puede atender todas las emergencias y que solo apoyará a la población más vulnerable (*El Mundo*, 2010). Por esta ola invernal se perdieron cerca de 600 viviendas.

Los anteriores aspectos, imponen como reto a los arquitectos e ingenieros para el siglo XXI lograr un hábitat que responda a las necesidades funcionales y estéticas de las poblaciones más vulnerables en condiciones económicamente favorables y sostenibles con respecto a su contexto, a través de la gestión de proyectos que contemplen tecnologías constructivas amigables con el medioambiente y su entorno. Este reto implica adentrarse en el campo de la tecnología con materiales reutilizados, de tradición ancestral o nueva, que produzcan bajo impacto ambiental, ahorro energético, disminución de residuos y optimización de costos.

Como alternativa a este reto ha surgido una solución tecnológica llamada construcción con botellas, un sistema de autoconstrucción que utiliza las botellas PET (plásticas) no retornables a manera de ladrillos. Las botellas se rellenan con tierra u otros materiales del lugar y se vinculan unas a otras por medio de tensores formando un sistema biomimético. Este sistema ha mostrado ser de bajo impacto ecológico y medioambiental (por la reutilización de botellas y tierra), de bajo costo –ya que se emplea mano de obra no calificada y materiales considerados ‘desperdicios’ –, proporcionando soluciones de vivienda flexibles y económicas, acordes con las necesidades de las comunidades más pobres.

Sin embargo, estos esfuerzos de las comunidades no han sido respaldados con estudios e investigaciones por parte de organismos o institu-

ciones que puedan determinar el comportamiento estructural ante un sismo. Por lo cual, hasta la fecha se han desarrollado proyectos en forma empírica mediante ensayos de prueba y error, sin una normativa que los regule y sin que cumplan con la norma colombiana de sismo resistencia NSR-10.

Por esta razón, el grupo GRIME (Grupo de Investigación de materiales y estructuras) de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Pontificia Universidad Javeriana se encuentra desarrollando una investigación sobre este sistema constructivo con el apoyo de Andreas Froese, técnico alemán, inventor del sistema. En una primera fase se documentó el proceso constructivo y el análisis de las características básicas de los elementos que conforman el sistema. Asimismo se hicieron unas pruebas piloto de comportamiento mecánico de muros y tanques. Se espera, en una segunda fase, continuar con el estudio del sistema en conjunto, sus componentes, mezclas y el comportamiento mecánico del sistema constructivo, de forma que sirvan de aporte a las necesidades de las comunidades más vulnerables y como solución de construcción post desastre. Este estudio complementará la línea de investigación que viene desarrollando desde el año 2002 el grupo de investigación en “Construcción en tierra”.

ANTECEDENTES

Existen varios referentes nivel mundial. El primero documentado son las construcciones desarrolladas por Michael Reynolds en la década de 1970 en los Estados Unidos. Estos desarrollos, principalmente, eran construidos con botellas de vidrio (Reynolds, 1990). Luego en el año 2005, se encuentra el segundo referente, edificado en Serbia por el profesor de ciencias físicas Tomislav Radovanovic. En Kragujevac, 130 kilómetros al sur de Belgrado, Radovanovic edificó una casa de 60 m² sustituyendo los ladrillos por 14.000 botellas de plástico rellenas con tierra (*El Clarín*, 2007). Posteriormente, en el 2007, se documenta un templo localizado en Tailandia, construido por monjes budistas llamado *Wat Pa Maha Chedi Kaew* en la provincia de Sisaket, unos 600 kilómetros al nordeste de Bangkok. Para su construcción se emplearon más de un millón de botellas recicladas de vidrio. Con su disciplina, los monjes buscaban crear conciencia ambiental mediante la recolección de botellas de color ámbar y verde, creando una edificación útil y estéticamente bella (*El País*, 2009).



Figura 1:
Prototipo de edificación
con botellas construido
por Organismo en
Tenjo- Cundinamarca

Fuente:
Cecilia López Pérez

A nivel latinoamericano, se ha construido con esta técnica acueductos, tanques de agua, muros de cerramiento, columnas y cubiertas, tanto en viviendas como en edificios de uso comunal en varias comunidades de Honduras, Bolivia, Salvador y Colombia (*El País*, 2005). La empresa que ha desarrollado estos proyectos con comunidades es Eco-Tec Soluciones Ambientales, que se estableció en Honduras, en el año 2001, con la finalidad de prestar asesorías en materia ambiental y en el manejo y aprovechamiento de residuos sólidos. Nació queriendo dar soluciones innovadoras y dinámicas a la problemática de la basura. El sistema de construcción con botellas desechables PET, se ha desarrollado y puesto a prueba desde antes de constituir la empresa con varias obras experimentales, tales como la 'Casa Ecológica' y el 'Acueducto romano en Botellas', ubicadas en el Ecoparque El Zamorano situado en los alrededores de Tegucigalpa, Honduras.

En los últimos 7 años Eco-Tec Soluciones ambientales ha desarrollado diversos proyectos con una visión integral, donde se atiende simultáneamente el medio ambiente y el desarrollo social, como por ejemplo un aula escolar en Honduras o la casa ecológica construida en Honduras con 8.000 botellas PET llenas con 12 m^3 de tierra de la zona. Diferentes organismos nacionales e internacionales han sido parte de la realización de los proyectos, tales como el Banco Mundial, Trocaire, y el Club Rotary International entre otros. En Colombia, la empresa ha construido un muro de cerramiento en el Parque Rio Cauca, en Cali y kioscos en Usme y Yopal.

¹ La cantidad de tierra necesaria para rellenar una botella depende del tipo de tierra y el peso específico, el valor que reporta el constructor corresponde a un peso específico promedio para este material.

VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA CONSTRUCCION CON BOTELLAS

Son varias las ventajas que presenta el sistema:

1. Duración: Las botellas plásticas (PET) tienen un periodo de degradación en el medio ambiente calculado en 200 a 300 años. Con lo cual se puede garantizar, por ese periodo, la estabilidad del material que contiene la tierra.

2. Buen aislamiento térmico: por tener como relleno tierra y un espesor mayor a 28 cms, resulta ser un buen aislamiento térmico, generando un diseño bioclimático.

3. Economía: Permite un ahorro hasta de 50 % en materiales en comparación con la construcción tradicional.

4. Autoconstrucción: El proceso de construcción es realizado por la misma comunidad necesitada, sin necesidad de una capacitación particular.

5. Botellas: No hay restricción por tamaño, forma o marca de las botellas para su uso en el sistema.

6. La mayor limitación que presenta el sistema es que no tiene reglamentación, ni estudios de caracterización, a nivel mundial y nacional, que permitan determinar el comportamiento del sistema.

SISTEMA CONSTRUCTIVO

En Febrero de 2011, se realizó un taller teórico-práctico por parte de Ecotec-Soluciones ambientales, con comunidades, estudiantes de arquitectura y diseño industrial de la Pontificia Universidad Javeriana, así como profesionales interesados en el tema, con quienes se construyeron prototipos para caracterizar el sistema constructivo con los siguientes resultados:

TRABAJO PREVIO

Las botellas se pueden llenar de polvo de escombros (Figura 2), tierra ó arena. El escombros se seleccionó en tres grupos: El primero, que es el más grande, sirve para la cimentación. El segundo tamaño sirve para rellenar las partes intermedias de las paredes, y el material más pequeño (polvo) sirve para rellenar las botellas.

LLENADO DE BOTELLAS

Se va introduciendo el material dentro de la botella a través de un embudo y se va apisonando cada capa hasta llenarla. Cuando la botella está llena no debe presentar abolladuras y al presionarla, no se debe hundir ninguna de sus caras laterales.

PEGA

Existen tres tipos de mezcla para el sistema:

Arena-cemento: esta mezcla se emplea en diferentes proporciones como pega o para pañetes en proporciones 1:4, 1:6 o 1:10 dependiendo del uso.

Cal-tierra: empleado como acabado final del sistema constructivo.

Tierra: utilizada como pega entre hiladas.

CIMENTACIÓN

Se debe tener una base de cimentación que garantice al menos la resistencia requerida para el peso propio de los muros hechos en botellas. Normalmente se recomienda el uso de una placa de base e concreto ciclópeo.

SOBRECIMIENTO

Se recomienda la construcción de sobrecimientos en piedra laja, ladrillo tolete común o ladrillo tolete cocido con algún tipo de impermeabilizante, que aisle la construcción de la humedad por capilaridad.

MUROS

Para la construcción de los muros es necesario que esté construida y nivelada la placa base, para ello se coloca la primera capa de mortero, que es una mezcla de arena-cemento. Sobre ella se colocan las botellas hasta obtener la primera hilada. La botella de la segunda hilada se coloca en el espacio medio de las botellas de la primera hilada. A medida que se van colocando las botellas se van amarrando por la cintura de la botella. Luego se procede a amarrar las tapas de las botellas, formando un amarre biomimético (Ver Figura 3).

Una vez obtenida la altura requerida se procede a llenar con los escombros de tamaño medio los espacios vacíos que hay entre cada botella de



Figura 2:
Material de relleno
de las botellas.
Fotografía:
Cecilia López

Figura 3:
Construcción de
muro con botellas.
Fotografía:
Cecilia López Pérez

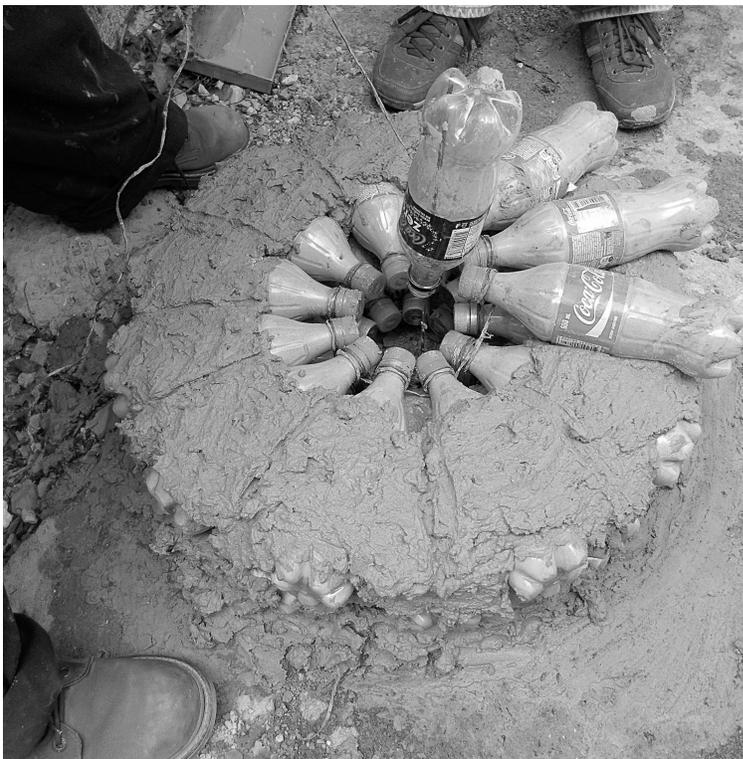
manera que se nivele la superficie para proceder a colocar la primera capa de pañete.

COLUMNAS

El sistema permite la construcción de columnas realizadas en los extremos de los muros como se



Figura 4:
Construcción de columnas.
Fotografía:
Cecilia López Pérez



describe más abajo, sin embargo su uso no es restrictivo. Se pueden emplear sistemas de concreto o madera como complemento a muros de botellas. Estos deben estar anclados a la cimentación y a la viga de soporte de la cubierta, formando un sistema de diafragma. Para su construcción se coloca una primera capa en arena-cemento y se van colocando las botellas de manera radial con la tapa hacia adentro (Ver Figura 4). Las tapas deben formar un anillo simétrico en el centro, que se va amarrando a medida que se va colocando las botellas. En el centro de esta columna se colocan los refuerzos que sean necesarios para formar la columna y soportar las solicitaciones de cubierta.

VANOS DE PUERTAS Y VENTANAS

Al llegar a la altura de puertas y ventanas proyectadas se deben dejar dinteles de madera o metálicos y continuar con el muro hasta obtener la altura pedida.

PISOS

Hasta el momento el estudio no ha encontrado restricciones para el empleo de algún piso en particular. Pueden ser empleados pisos de madera, plásticos, baldosas de cemento, arcilla y granitos.

ACABADOS

Como acabados se pueden emplear pañetes de tierra, cal o arena-cemento. Dependiendo del tipo de pañete se recomienda emplear pinturas de agua o aceite. En las zonas donde hay presencia de humedad (cocinas, áreas de ropas y duchas) se recomienda el uso de enchapes que no permitan el contacto del agua con el material.

OTROS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS: TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE AGUA

El sistema ha demostrado tener aplicación en otros elementos de construcción, especialmente post desastre como tanques de almacenamiento de agua. Para la construcción de un tanque se prepara una superficie plana y nivelada. Sobre esta superficie se levanta una primera capa de pega de arena-cemento. Se debe tener precaución de dejar, previamente, los tubos de desagüe necesarios para el lavado del tanque. En el centro se coloca una varilla o elemento guía, que sirva de compás o base del círculo. Se amarra la botella por la cintura con la tapa hacia afuera. Al finalizar el

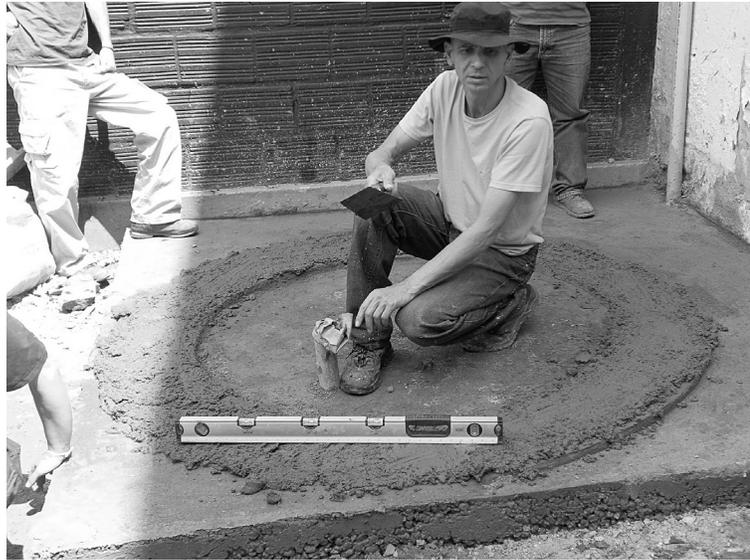


Figura 5:
Proceso constructivo
de un tanque de agua.
Fotografía:
Cecilia López Pérez

Tabla 1
Resultados de pruebas de resistencia máxima

Fuente:
Elaboración propia a partir de información del INDEC, Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2001.

| Probeta | Relleno | Tamaño (ml) | Carga máxima soportada (kN) |
|---------|------------------------|-------------|-----------------------------|
| 1 | Escombros | 600 ml | 310 kN |
| 2 | Escombros | 1.500ml | 192 kN |
| 3 | Mini relleno sanitario | 2.000 ml | 50 kN |
| 4 | Tierra arenosa | 600 ml | 101 kN |
| 5 | Tierra arenosa | 1.500 ml | 70 kN |
| 6 | Vacía | 600 ml | 5 kN |
| 7 | Vacía | 1.500 ml | 4 kN |

círculo se amarra la primera botella con la última, con un doble nudo. De esta manera se construyen capas sucesivas hasta encontrar la altura solicitada (Ver Figura 5). La segunda capa de mortero se construye con tierra. Es importante verificar la nivelación de las botellas desde el radio y de manera horizontal con las botellas de la hilada. Una vez que se tenga la altura requerida del tanque, se debe pañetar de manera interna con una mezcla de arena-cemento. Es usual que el tanque se recubra al interior con un plástico con el fin de evitar filtraciones.

MANO DE OBRA

El sistema plantea la construcción como un proceso que integra la comunidad a través de una capacitación por autoconstrucción. Para que estos procesos puedan ser gestionados se requiere: Voluntad de la comunidad de participar en el proceso y deseos de superación.

Apoyo de entes o profesionales que preparen el proyecto: diseño, bocetos, planos, presupuestos, etc. Como contraparte la comunidad beneficiada aportará la mano de obra, el material,

terreno y otro tipo de apoyo necesario dentro del proceso constructivo.

Selección, recolección y organización de la materia prima para la construcción: Botellas PET, tierra, arena o escombros del lugar y cuerdas de plástico.

PRUEBAS DE LABORATORIO

Con el fin de evaluar de manera preliminar algunas características generales de las botellas rellenas, se hicieron tres tipos de pruebas. En primera medida se hicieron ensayos de compresión simple de botellas, posteriormente se hicieron ensayos de volteo simple de muros hechos con botellas de acuerdo con la referencia (Yamín et. al., 2007). Y por último se hizo una prueba piloto de los niveles de deformación de un tanque hecho a base de botellas en la medida que se iba llenando con agua. A continuación se describirán dichas pruebas.

ENSAYOS A COMPRESIÓN DE BOTELLAS

En el Laboratorio de Pruebas y Ensayos del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana se realizaron las primeras pruebas de resistencia máxima de botellas rellenas sometidas a cargas de compresión: Dichas pruebas se realizaron con las botellas acostadas (tal como se instalan en la obra) como se ilustra en la Figura 6.

En la Tabla 1 se resumen los resultados de carga máxima resistente para estas primeras pruebas piloto. Se probaron botellas de tamaños de 600 ml, 1.500 ml y 2.000 ml y con diferentes rellenos: escombros, tierra arenosa, vacías y con minirelleno sanitario. En la totalidad de los casos las botellas fueron ensayadas con las tapas plásticas roscadas en su extremo correspondiente (Véase la Figura 6).

De acuerdo con estas primeras pruebas, el relleno que mejor soporta la aplicación de la carga es el escombros seguido por la tierra arenosa. Asimismo, a la luz de los resultados, las botellas

Figura 6:
Prueba de resistencia a la compresión.
Fotografía:
Cecilia López Pérez



de menor tamaño (600 ml) presentaron una carga resistente superior y las botellas vacías soportaron una carga notablemente inferior a la que soportan las botellas con algún tipo de relleno.

ENSAYOS DE VOLTEO EN MURO

De acuerdo con Yamín et. al. (2007), el objetivo de este ensayo consiste en determinar la resistencia del espécimen a una aceleración uniforme que actúa en dirección perpendicular al plano, e identificar el mecanismo de colapso más probable del elemento en esta dirección. Para ello se elaboró un muro completo en botellas de 1.500 ml, dentro de un marco metálico de soporte que se encarga de transmitir las cargas al muro. El muro se sometió a un proceso de volteo lento mediante un montacargas generando una carga uniformemente distribuida perpendicular al plano del muro (Figura 7a). El ensayo se terminó, cuando se detectó un comportamiento anómalo en el muro, el cual se dio en un ángulo de 60 grados con respecto a la vertical, momento en el cual las botellas se empezaron a inclinar hacia delante, generando una deformación con doble concavidad, como se aprecia en la Figura 7b. En este instante el amarre de las botellas con cuerdas plásticas empezó a perder tensión, aunque no hubo colapso del muro. Una vez se retornó el muro a su posición vertical, se reubicaron manualmente (empujando) las botellas en su posición original.

ENSAYOS DE TANQUE EN BOTELLAS

Mediante botellas rellenas de tierra arenosa, se construyó un tanque de 1.400 mm de altura y 1.500 mm de diámetro exterior con botellas de 1.500 ml. El esquema del tanque (elaborado con 720 botellas) se presenta en la Figura 8.

Una vez construido el tanque se instrumentó con dos deformímetros tipo LVDT (Ver Figura 9a): uno a 1.000 mm desde la base y otro a 520 mm. Una vez hecho esto se introdujo un plástico al interior del tanque que evitara las fugas de agua del mismo. Posteriormente, se llenó el tanque con agua y se registró para cada incremento de altura los desplazamientos registrados por los deformímetros. Dichos desplazamientos se muestran en la Figura 10. El tanque se llenó únicamente hasta una altura de 1.200 mm ya que a dicha altura empezaron a aparecer daños en las paredes del mismo que hacían peligroso conti-



Figura 7: Ensayo preliminar de volteo en muros de botellas. a) Detalle del volteo con Montacargas. b) Estado del muro con una inclinación de 60 grados.

Fotografía: Cecilia López Pérez

nuar con la prueba. Al analizar simultáneamente la Figura 9b con la Figura 10 es claro que el daño del sistema estructural y los desplazamientos de las botellas se concentraron en la mitad superior del mismo, con desplazamientos remanentes del orden de 35 mm.

Con base en lo anterior no se recomienda hacer tanques demasiado altos, puesto que la presión hidrostática se incrementa con el cuadrado de la altura del nivel del agua. Para demostrar esta observación, se grafica en la Figura 11 la presión hidrostática (en kN/m^2) en función del desplazamiento registrado a 1.000 mm de altura. De acuerdo con esta figura, el desplazamiento empieza a tener un incremento importante (punto de inflexión) cuando el nivel de agua llega a 650 mm de altura (presión hidrostática de 2.1 kN/m^2), por lo que en este caso se recomendaría

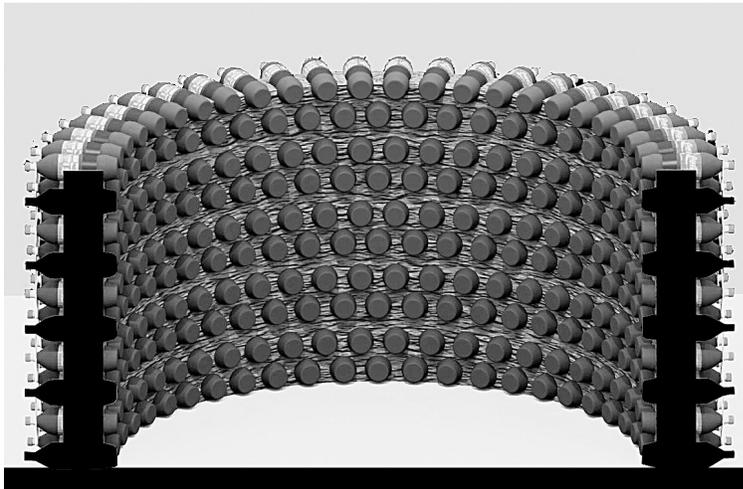


Figura 8:
Esquema de tanque
hecho con botellas.
Fotografía:
Graficación David Sierra

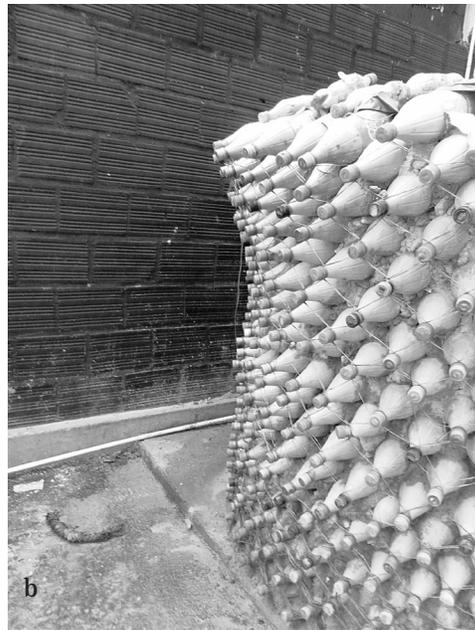


Figura 9:
a) Localización
de los LVDT.
b) Desplazamientos
del tanque hecho con
botellas de 1.500 ml.
Fotografía:
Cecilia López Pérez

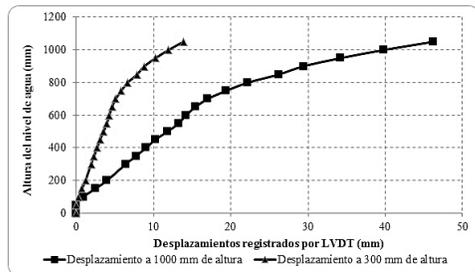


Figura 10:
Desplazamientos
tangenciales del
tanque a dos alturas
Fuente:
Cecilia López Pérez

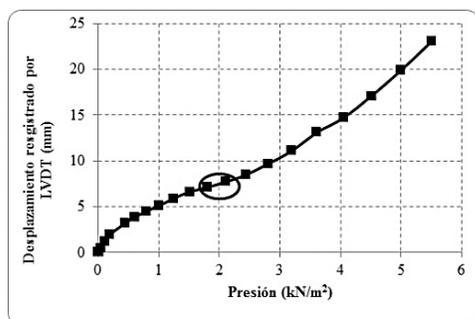
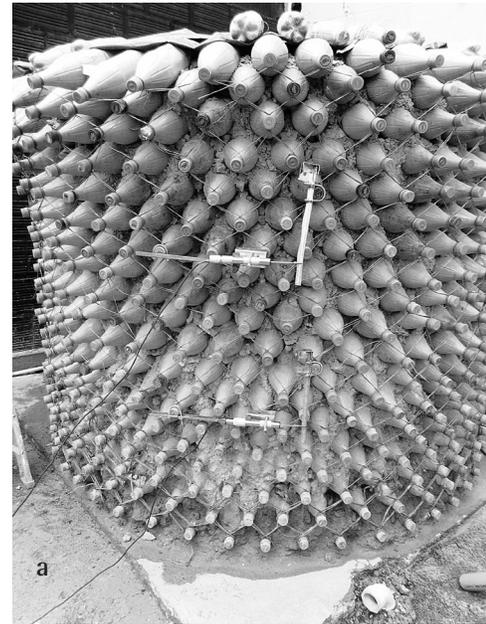


Figura 11:
Presión vs
desplazamiento del
tanque en dirección
tangencial
Fuente:
Cecilia López Pérez



limitar la altura máxima de tanques para minimizar los daños.

CONCLUSIONES

Esta primera fase de desarrollo de la investigación mostró que el sistema tiene características de estabilidad para ser empleado en construcciones de bajo costo y post desastre. Adicionalmente, muestra ser versátil para ser empleado en diferentes diseños y formas. Los valores de carga máxima resistente a la compresión de las botellas llenas de escombros están en el orden de magnitud de las fuerzas resistentes de un ladrillo de arcilla cocido con perforaciones horizontales. Para aplicaciones en tanques, se debe limitar la altura máxima de los mismos con el fin de minimizar los riesgos de daño y de colapso.

La primera fase de desarrollo de la investigación mostró que se debe continuar con las investigaciones de caracterización en laboratorio para determinar la viabilidad del sistema como elemento no estructural, su resistencia a la tensión y modulo de rotura. Por ello dentro de los trabajos futuros se pretende estudiar el comportamiento de los muros ante diferentes esquemas de aplicación de carga que simulen efectos de tensión, flexión y flexo-tracción variando las características de las botellas y su material de relleno.

Referencias

- Clavijo, S., Michel, J., & Muñoz S. (2004). *La vivienda en Colombia: Sus determinantes socioeconómicos y financieros*. Bogotá, Colombia: Banco de la República.
- El Clarín*. (2007, agosto 28). Una casa hecha solamente con botellas de plástico. *Periódico El Clarín*. Sección curiosidades.
- El Mundo*. (2010, noviembre 10). Más de un millón de damnificados por el invierno en Colombia. *Periódico El Mundo de España*. Sección América.
- El País*. (2005). Una 'casita encantada', armada con botellas, causa sensación. *El país.com.co-AFP. Periódico El País de Cali*. Recuperado de: <http://historico.elpais.com.co/paionline/notas/Abril082008/casitaencantada.html#>
- - -. (2009)Templo budista hecho con botellas reusadas. *El país.com.co-AFP. Periódico El País de Cali*. Recuperado de: <http://lacomunidad.elpais.com/cortesamador>
- El Tiempo*. (2007, octubre 9). Basura reciclada se empezará a recoger oficialmente en Bogotá a partir del 3 de Diciembre. *Periódico El Tiempo*.
- Osuna Vargas, M. A. (2007, mayo) Ingenio Universitario contra el déficit de VIS en Colombia. *Revista Construdata*. Recuperado de: <http://www.construdata.com/BancoConocimiento/C/convive4/convive4.asp>
- ONU- HABITAT. (2010). Estado de las ciudades de América Latina y el Caribe. Publicación del Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos humanos. Recuperado en: http://www.onuhabitat.org/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=362&Itemid=18
- Reynolds, M. (1990). *Eartship*. How to Build your Own. Vol. 1. Taos: Solar survival Architecture Press.
- Yamín L., Phillips C., Reyes J., Ruiz D. (2007, julio-diciembre). Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *Revista Apuntes*, 20 (2), 286-303.

