



**Encuentro Internacional de
Educación en Ingeniería ACOFI**

Innovación en las facultades de ingeniería:
el cambio para la competitividad y la sostenibilidad

Centro de Convenciones Cartagena de Indias

4 al 7 de octubre de 2016



ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TECHOS VERDES PARA EL MANEJO DE INUNDACIONES: CASO DE ESTUDIO CHAPINERO COLOMBIA

Óscar Contreras Bejarano, Paula Andrea Villegas González

**Universidad Católica de Colombia
Bogotá, Colombia**

Resumen

El artículo presenta el análisis de la sustitución de un techo convencional (teja de barro español) por un techo verde en una vivienda con el fin de evitar inundaciones. Considerando que este es un problema que se presenta en algunas zonas de Bogotá, entre ellas las localidades de Usaquén y Chapinero de la ciudad de Bogotá, donde no funciona de manera eficiente el alcantarillado pluvial encargado de drenar las aguas lluvias. Se modela mediante el programa EpaSwmm la red de alcantarillado pluvial de la zona, en la que se incluyen las curvas IDF, y las propiedades tanto de los techos convencionales como de los techos verdes. El objetivo es simular las precipitaciones que representen los efectos de implementar cada uno de los sistemas de cubierta, por tanto, construir un techo verde el agua lluvia se retendrá en su sustrato, reduciendo el caudal de agua que llega al alcantarillado pluvial, de modo que este pueda trabajar en una condición no saturada y así evitar la colmatación de los ductos y posterior inundación. Por otro lado, al sustituir el techo convencional por un techo verde, se genera una sobrecarga a la estructura existente y requeriría de un refuerzo en sus elementos estructurales, implementando el programa SAP2000 se analiza el comportamiento estructural de un edificio de 5 pisos, al cual se le sustituye la carga de un techo convencional por la de un techo verde, para evaluar el cumplimiento de la deriva y el periodo fundamental del edificio mencionado en la NSR-10 (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente). Para la implementación de este tipo de estructuras ambientalmente sostenibles es necesario realizar los análisis propuestos, esto con el fin de generar ideas innovadoras, que cumplan con los requerimientos técnicos que exige una obra de ingeniería

Palabras clave: techo verde; inundación; modelación; ambiente

Abstract

The article presents the analysis of replacing a conventional roof by a green roof with the purpose of prevent flooding, considering that this is a problem in an area located between the towns of Usaquen and Chapinero of Bogota city, because of the inefficiency of the storm sewer to drain rainwater. To start is modeled by the EPA SWMM program the storm sewer network in the zone, they included the IDF curves, and the properties of both conventional roof and green roof, in order to simulate rainfall representing the effects of implementing each of the systems covered, so, to implement a green roof rainwater is retained on its substrate, reducing the flow of water reaching the storm drain, so that this can in an unsaturated condition and avoid clogging of pipelines and subsequent flooding. On the other hand, to replace the conventional roof by a green roof, is generated an overload to the existing structure and required a reinforcement in structural elements, implementing the SAP2000 program is modeled by the FEM (finite element method) a solid slab unidirectional, loaded with both the weight of a conventional roof as a green roof, with the aim of examining the internal behavior of the slab, likewise the structural behavior of a 5-story building is analyzed, to wich the load is replaced a conventional roof by a green roof, to assess compliance drift and the fundamental period of the building mentioned in the NSR-10 (Colombian Earthquake-resistant Construction Regulations).

Keywords: *green roof; flood; modeling; environment*

1. Introducción

Bogotá se encuentra en un proceso de renovación ambiental, en donde proyectos de desarrollo sostenible son tenidos en cuenta para la ciudad. Una de las ideas viables a implementar en la capital Colombiana son los techos verdes, puesto que son una solución a problemas de temperatura, manejo de aguas lluvias y purificación del aire, ayudando a los bogotanos con las inundaciones, temporadas de calor y contaminación, además sirven como ejemplo para otros lugares del mundo en los que tengan problemas similares.

Bogotá está construida con escasas áreas verdes, un factor incidente en este contexto es la escorrentía, que antes del auge de la construcción se infiltraba a través del campo de la sabana de la ciudad, actualmente escurre por las calles y tejados al alcantarillado pluvial, el cual no se encuentra en capacidad para drenar las aguas lluvias en su totalidad, trayendo como consecuencia inundaciones que generan problemas sociales y económicos a la población. Los techos verdes cumplen la función de los campos que existían en la ciudad, infiltran parte de la precipitación, y atenúan el caudal que llega al alcantarillado pluvial, evitando la colmatación de los ductos y posterior inundación.

Tal es el caso del norte de Chile, en donde se notificó la noticia de 23 víctimas fatales, (Reuters, 2015), después de la fuerte inundación provocada por las intensas lluvias que azotaron al país. Estos fenómenos pueden formar diferentes escenarios de riesgo, dado que, al presentarse eventos de precipitación, se pueden provocar procesos

de remoción en masa, erosión, saturación del sistema de alcantarillado, entre otros; que afectan a la población, los recursos naturales, y su infraestructura.

Una de las emergencias más graves presentadas en la capital colombiana, ocurrió el 23 de marzo de 2015, en donde a causa de las fuertes granizadas, algunos barrios de la ciudad terminaron inundados. En consecuencia, algunos techos de las viviendas ubicadas en zonas que presentan riesgo por inundación se desplomaron, colocando en riesgo la vida de los habitantes que sufrieron este fenómeno. El SDGRCC (Sistema Distrital de Gestión de Riesgo y Cambio Climático) reportó dos personas que presentaron hipotermia y una persona con un trauma craneoencefálico severo (El Tiempo, 2015).

De acuerdo con la GRHC (Green Roofs for Healthy Cities), en Estado Unidos creció un 24% la industria de azoteas verdes gracias a los beneficios que trae su instalación, y todavía hay un enorme potencial para el crecimiento de nuevos techos verdes en Norte América. (Heller y Psencik, 2014). Como Estados Unidos, Colombia se encuentra en un continuo crecimiento de tecnologías sostenibles como los techos verdes. La densificación de la ciudad de Bogotá requiere de la implementación de métodos innovadores, para solventar los problemas que se originan con el aumento demográfico y de la construcción que vive actualmente. Los techos verdes proporcionan una mejor calidad del medio ambiente, control de la temperatura, manejo de aguas lluvias, un buen aspecto estético a la edificación, y un posible sembradío de plantas o alimentos, características que para la ciudad de Bogotá sería importante implementar en el marco del desarrollo sostenible.

2. Inundaciones urbanas en la zona norte de la localidad de Chapinero, Bogotá

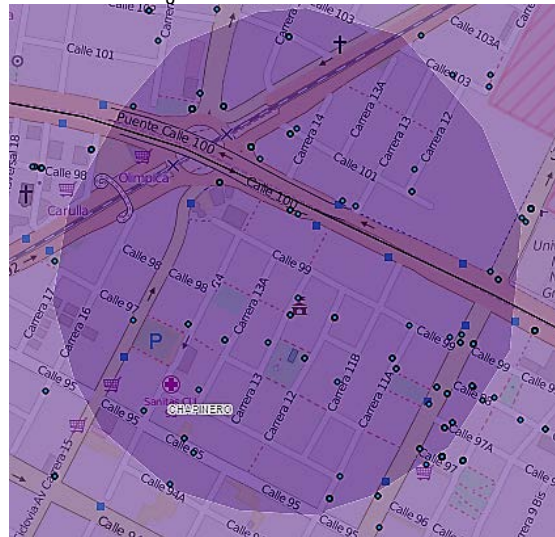
Las inundaciones urbanas son generadas en algunos casos por la saturación de las tuberías que conforman la red de alcantarillado pluvial. Cuando se presenta una precipitación la primera superficie de contacto de las aguas lluvias son los techos de las edificaciones, estos, al ser en su mayoría de teja de barro español, de plástico o fibrocemento, poseen una superficie con un coeficiente de fricción bajo, el caudal que llega a los techos proveniente de la precipitación, se convierte en escorrentía dirigida a los sumideros de las calles y posteriormente a los ductos del alcantarillado pluvial.

Las basuras que se generan por las personas son un factor negativo, dado que se crean obstáculos para el libre flujo del agua, ayudando de esta manera a acumular el caudal de entrada al alcantarillado.

La función del techo verde es detener el agua pluvial, y hacer llegar el mismo caudal de precipitación al alcantarillado a una tasa mucho menor, puesto que al retenerse en el techo, los ductos drenaran un menor caudal, evitando saturarse e impidiendo la inundación.

El IDIGER (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático) elaboró un mapa en donde se muestran los eventos de inundación y encharcamiento en la ciudad de Bogotá desde el 2010 hasta el 2015, la zona escogida para realizar el estudio se muestra en la figura No.1.

Figura 1. Zona de inundación



Fuente: Oscar Contreras Bejarano, adaptado de: Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático. (2014). "Densidad de eventos de inundación y/o encharcamientos 2010-2015". Bogotá Colombia. Consultado el 14 de febrero de 2014 en: <http://fopae.maps.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=58e2eedafd534dd79dd60cf3d43afbe9>

Este mapa contempla círculos de colores, en donde la intensidad de tono es directamente proporcional a la concentración de las inundaciones que se presentan. Con el fin de obtener más información acerca de las inundaciones del sector, se realizaron encuestas a los habitantes de la zona, en las cuales la población ratificó la inconformidad con las inundaciones que se presentan cuando ocurren precipitaciones fuertes, y también se consideraron optimistas con la idea que se les planteó acerca de la implementación de los techos verdes.

Teniendo en cuenta la percepción de la comunidad y los análisis de procesos de inundación en Bogotá, se elabora un modelo de inundación para comparar el comportamiento frente a una precipitación de los techos actuales con los techos verdes.

3. Modelación del alcantarillado pluvial mediante EPA SWMM y solución a los problemas de inundación del área afectada

Mediante el programa Epa Swmm se modela el escenario de la inundación. En cuanto a las cubiertas, se ingresan las propiedades de escorrentía e infiltración para el techo convencional y el techo verde, este último con una escorrentía menor y una infiltración mayor a los techados existentes.

El material de los techos existentes en la zona de estudio está conformado por teja de barro español, teja plástica y teja en fibrocemento como se observa en la tabla No.1.

Fuente: Oscar Contreras Bejarano

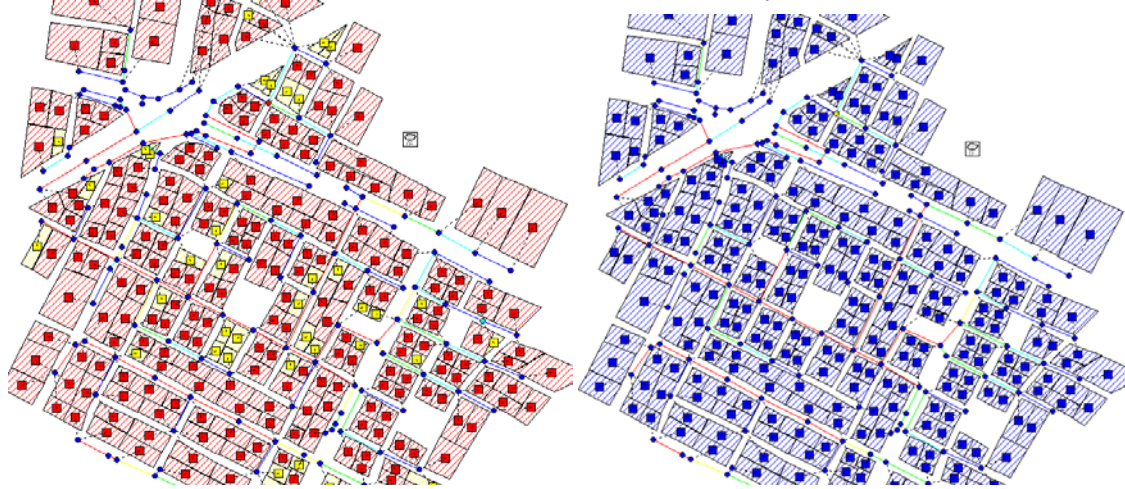
| Tipo de cubierta | | | |
|---------------------------|----------------------|------------------|----------------|
| Teja de barro español | Teja en fibrocemento | Teja de plástico | Teja combinada |
| 47 | 90 | 102 | 126 |
| Función de la edificación | | | |
| Residencial | Comercial | Otro | |
| 265 | 88 | 12 | |

Tabla 1. Tipología de las cubiertas del área afectada de estudio

Posteriormente se asignan los valores correspondientes a las cotas, diámetros y materiales de las tuberías que conforman el alcantarillado pluvial del área, y por último, se define la precipitación de la zona, implementando las curvas IDF, proporcionadas por el departamento de hidrología aplicada de la empresa de acueducto y alcantarillado de la ciudad de Bogotá.

El modelo simula las condiciones de inundación presentes y a futuro, las cuales dejan en evidencia que al implementar las cubiertas verdes se reducirán los impactos negativos que sufren actualmente los habitantes del área comprendida entre calles 94 y 106, la Universidad Militar Nueva Granada y la avenida carrera 15.

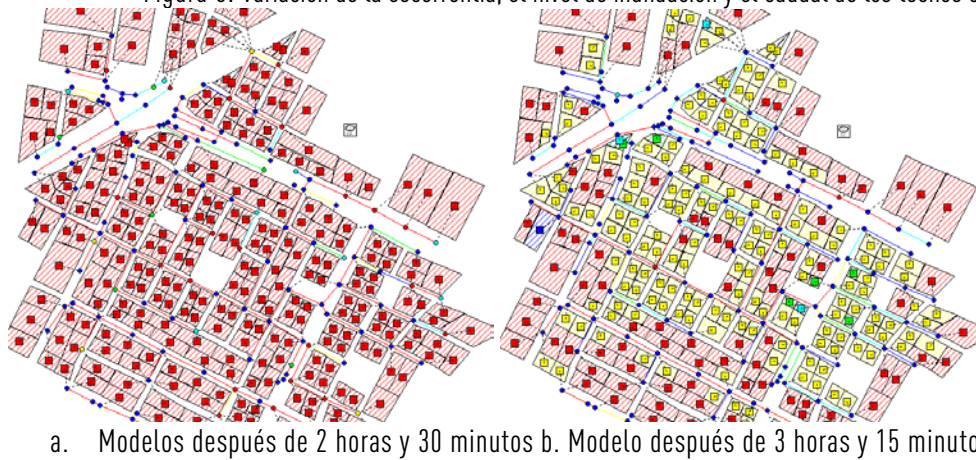
Figura 2. Variación de la escorrentía, el nivel de inundación y el caudal de los techos verdes



a. Modelos después de 2 horas y 30 minutos b. Modelo después de 3 horas y 15 minutos

Fuente: Oscar Contreras Bejarano

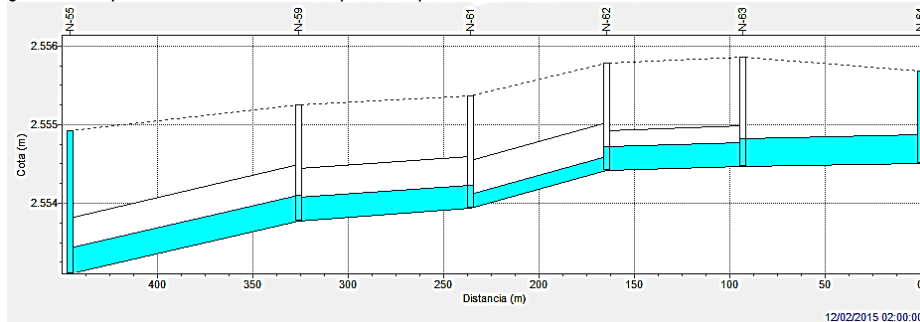
Figura 3. Variación de la escorrentía, el nivel de inundación y el caudal de los techos convencionales



Fuente: Oscar Contreras Bejarano

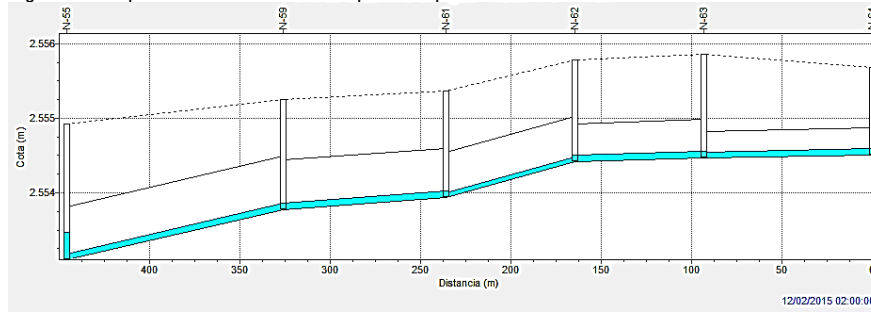
El color rojo significa valores altos en escorrentía, mientras que el color azul, significa que el agua pluvial se infiltra en la cubierta dejando de generar escorrentía. En cuanto a los nodos, un color rojo significa que presenta niveles de inundación, por el contrario, un color azul implica que se está manejando un caudal sin saturación de las tuberías. El modelo muestra que los techos verdes después de una exposición a la precipitación de 3 horas y 15 minutos no presentan escorrentía ni inundaciones, y los ductos se encuentran en un proceso de descarga controlada; mientras que los techos convencionales, después de este tiempo aun generan escorrentía, se presentan zonas de inundación, y algunos ductos se encuentran trabajando a una capacidad máxima. Por lo que se demuestra la eficiencia de esta tecnología, no solo para controlar problemas de inundación, sino también para aumentar la calidad ambiental y el desarrollo sostenible de la ciudad.

Figura 4. Capacidad de las tuberías para un periodo de retorno de 3 años con techos convencionales



Fuente: Oscar Contreras Bejarano

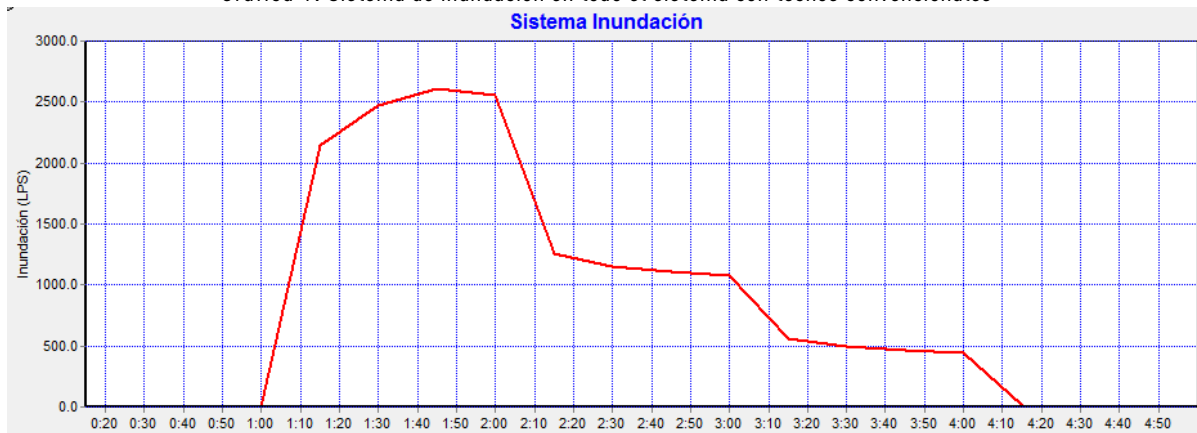
Figura 5. Capacidad de las tuberías para un periodo de retorno de 3 años con techos verdes



Fuente: Oscar Contreras Bejarano

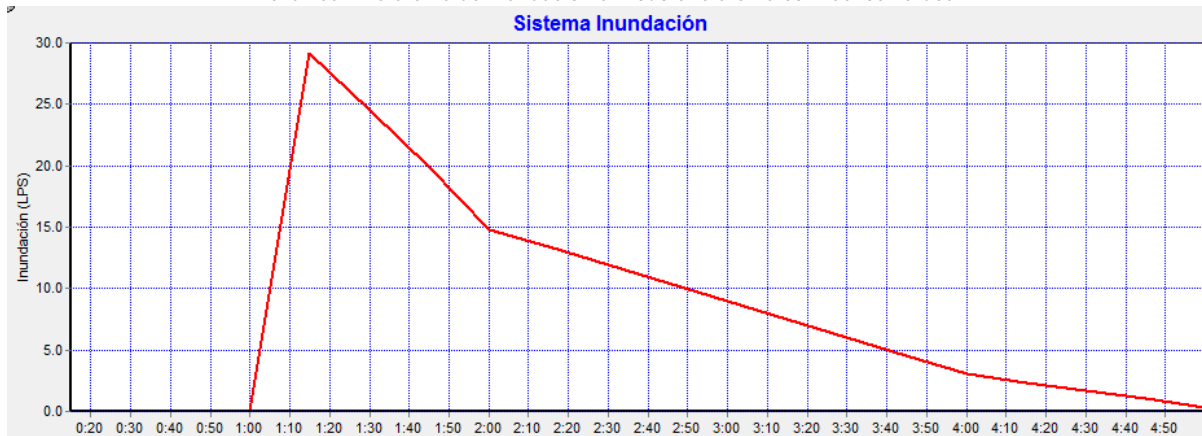
En la figura 4, se expone la inundación que sufren los pozos N-64 y N-55 después de 2 horas de precipitación para un periodo de retorno de 3 años. En el mismo tramo de tuberías de la red de alcantarillado pluvial, al implementarse los techos verdes (Ver figura 5), la capacidad disminuye de un 100% a un 22%, y para un periodo de retorno de 100 años con techos verdes (ver figura 6), la capacidad de trabajo del mismo tramo de tuberías es del 30%.

Gráfica 1. Sistema de inundación en todo el sistema con techos convencionales



Fuente: Oscar Contreras Bejarano

Gráfica 2. Sistema de inundación en todo el sistema con techos verdes



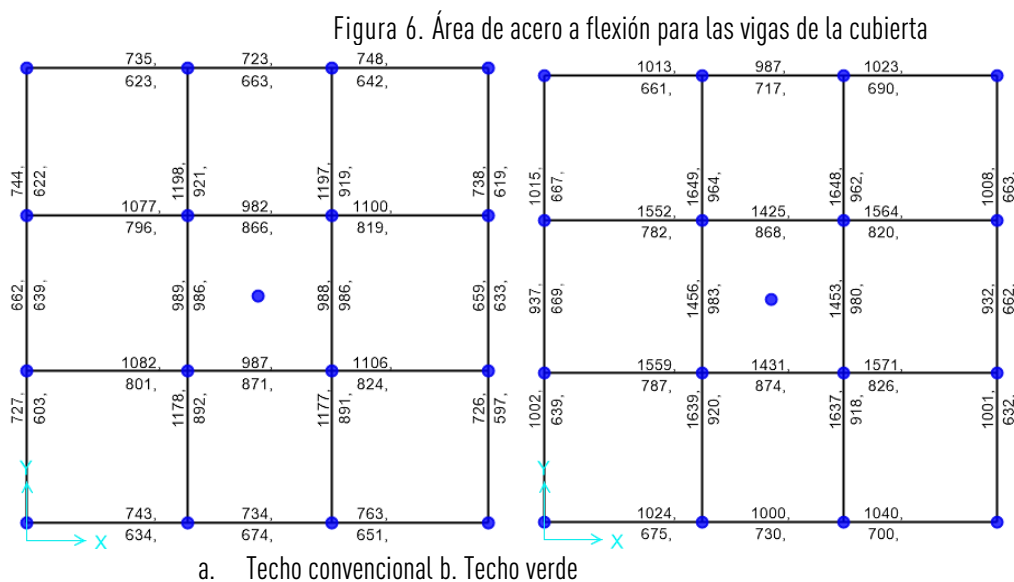
Fuente: Oscar Contreras Bejarano

La gráfica 1 muestra el caudal total de la inundación que se produce de toda el área estudiada en 4 horas de precipitación, el evento posee un pico que alcanza los 2600 l/s de inundación. A medida que pasa el tiempo se va atenuando hasta que se drena todo el volumen de agua lluvia, por el contrario, en la gráfica 2 se observa claramente un pico de 30 l/s en todo el sistema. Esto evidencia que las cubiertas verdes son una solución eficiente hablando en términos de inundaciones provocadas por la colmatación de los ductos del alcantarillado. Aunque el problema de las inundaciones estaría solucionado con los techos verdes, al instalar dichas cubiertas en las edificaciones existentes, se generarían nuevas cargas en el diseño de las estructuras. Dado que se presenta un aumento en el peso de la estructura, se realiza un análisis de su comportamiento en un edificio al cual se le sustituyen las cargas de la cubierta.

4. Análisis de la vulnerabilidad de un edificio de 5 pisos ante la sustitución de las cargas de los techos

En esta sección se realiza el modelo de un edificio de 5 pisos en concreto reforzado con losa aligerada y un techo con tejas de barro español, el proceso de diseño incluye el cálculo de los pesos de las viguetas que conforman la losa, las reacciones de las mismas, que al transferirse la carga se convierten en las nuevas cargas que sienten las vigas de la estructura, continuo a esto se ingresan los valores de las cargas vivas y muertas a los elementos estructurales horizontales del edificio, se asignan las combinaciones de carga y la fuerza horizontal equivalente según la NSR-10, que fue calculada teniendo en cuenta las condiciones de sismicidad de la zona en estudio, y posteriormente se calculan los desplazamientos de la estructura, corroborando tanto la deriva como el periodo fundamental de la estructura.

La figura 6 interpreta la cantidad de acero de refuerzo a flexión en mm^2 que requieren los elementos estructurales de la cubierta para soportar el peso de un techo convencional y el techo verde.



Fuente: Oscar Contreras Bejarano

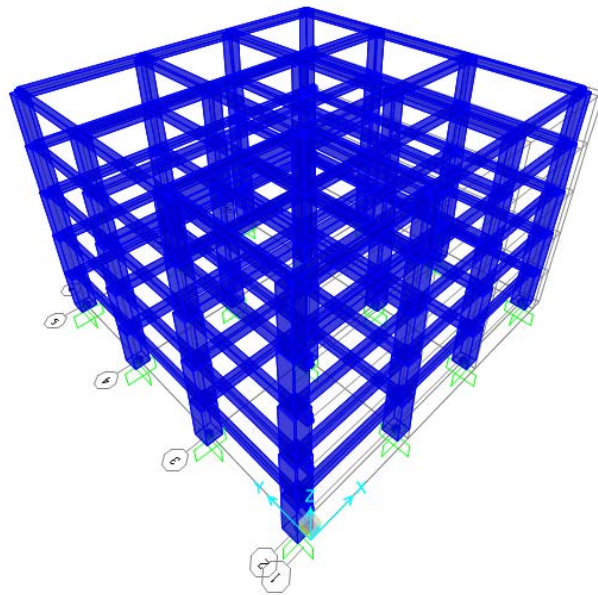
Puesto que el peso de un techo verde oscila entre 70 kg y 170 kg por metro cuadrado es necesaria una planificación en la fase de diseño, o mejoras estructurales para soportar dicho peso (Oberndorfer *et al.*, 2007).

Al sustituir un techo convencional por un techo verde, las vigas de la cubierta serán las primeras en recibir las nuevas cargas, es por eso que son los elementos más críticos a analizar. Las diferencias en el área de acero pueden llegar a 500 mm^2 en las vigas del techo, y se requeriría de un refuerzo estructural en dichos elementos. Como la carga que se está transfiriendo a lo largo del edificio se disipa con las vigas del techo, cuando dicha carga llegue al cuarto piso las diferencias máximas de áreas de acero se reducen, estas alcanzan los 200 mm^2 . A medida que se transmite por los pisos, el área de acero requerido va disminuyendo, es decir, el refuerzo estructural será menor, si se solicita. La diferencia de áreas de acero para los pisos tercero, segundo y primero son 100 mm^2 , 50 mm^2 , y 30 mm^2 respectivamente.

Dicho cálculo de áreas de acero indica que al implementar un techo verde sobre una estructura existente, el refuerzo requerido en todos sus elementos estructurales debe atender a las nuevas áreas de acero obtenidas, que corresponden aproximadamente a la mitad del refuerzo estructural del piso inmediatamente superior, aunque siempre se deben hacer los cálculos pertinentes.

Para observar la escala de la estructura en estudio, en la figura 7 se muestra una edificación que tiene 20 m de lado y 15 m de alto.

Figura 7. Edificación estudiada



Fuente: Oscar Contreras Bejarano

Cabe aclarar que las especificaciones de la NSR-10 en cuanto a deriva (ver tabla 2) y periodo fundamental (ver tabla 3), cumplen satisfactoriamente después de agregadas las cargas correspondientes a los techos verdes sobre la estructura.

Fuente: Oscar Contreras Bejarano

| Validez de la deriva según la NSR-10 | | | | |
|--------------------------------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|
| Piso | Techo convencional | | Techo verde | |
| | Desplazamiento (mm) | Deriva (mm) | Desplazamiento (mm) | Deriva (mm) |
| Piso 1 | 2,95 | 2,95 | 3,03 | 3,03 |
| Piso 2 | 10,41 | 7,46 | 10,77 | 7,44 |
| Piso 3 | 19,77 | 9,36 | 20,66 | 9,89 |
| Piso 4 | 28,81 | 9,04 | 30,60 | 9,94 |
| Piso 5 | 35,64 | 6,83 | 35,64 | 5,04 |

Tabla 2. Comparación de las derivas de la estructura según la NSR-10

Según la NSR-10, los desplazamientos laterales máximos que puede tener un edificio están limitados al 1% de la altura del piso, que corresponde a 30 mm como diferencia máxima en los desplazamientos laterales de pisos contiguos.

La tabla 2 condensa los resultados obtenidos del análisis del edificio de 5 pisos (ver figura 7) en cuanto a desplazamientos. La onda sísmica al entrar en contacto con el suelo del área afectada y en relación con la altura y rigidez del edificio, genera desplazamientos en cada uno de los pisos del mismo. La validez de la deriva según la NSR-10 radica en que la diferencia de los desplazamientos de pisos contiguos del edificio sea menor al 1% de la altura del piso, para el caso que se presenta, las derivas tanto del techo convencional como del techo verde son menores a 30 mm, por lo que la estructura cumple dicho requerimiento técnico.

El segundo requisito que exige la norma de construcción colombiana es el periodo fundamental de la estructura, el cual debe encontrarse en el rango definido por el 10% por encima o por debajo del periodo fundamental calculado inmediatamente anterior, para este caso dicho periodo corresponde al obtenido con las cargas del techo convencional, como se evidencia en la tabla 3.

Tabla 3. Comparación de los periodos fundamentales de la estructura según la NSR-10

| Validez del período fundamental de la estructura | | | |
|--|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| Techo convencional | | Techo verde | |
| Período inicial (s) | Período calculado (s) | Período inicial (s) | Período calculado (s) |
| 0,371 | 0,371 | 0,371 | 0,398 |

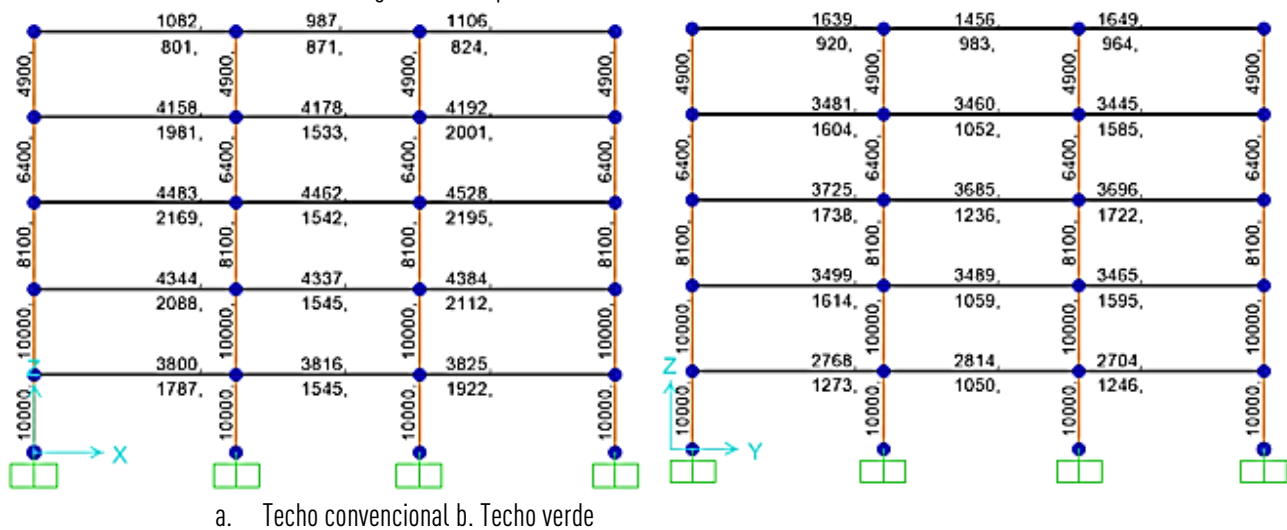
Fuente: Oscar Contreras Bejarano

En el diseño de una edificación, la NSR-10 permite expresar un valor inicial aproximado para el periodo fundamental de la estructura, ya que este depende de los desplazamientos que se obtienen después de la actividad sísmica del lugar de y las características geométricas de la estructura. Se calcula el nuevo periodo fundamental, que para el caso del edificio con el techo convencional es de 0,371 s, dicho período con el requisito especificado en la norma, dado que este se encuentra entre un 10% por encima o por debajo del valor anterior (ver tabla 3). Puesto que se realiza un cambio de carga a la estructura existente, se analiza el periodo fundamental de la estructura con el techo verde a partir del último periodo calculado con el techo convencional, para lo cual se obtiene un valor de 0,398 s incluido en el rango de 0,334 s a 0,408 s con referencia en 0,371 s.

Lo anterior demuestra que, al implementar un techo verde sobre una edificación con un techo convencional, tanto la deriva como el periodo fundamental de la estructura cumplen con las especificaciones de diseño de la NSR-10.

Dado que las columnas en la edificación están gobernadas por la compresión, es el concreto el material que realiza el trabajo de contrarrestar la sobrecarga generada por el techo verde. Por esta razón no se presentan diferencias en las áreas de acero de las columnas (ver figura 8), aunque se debe realizar el cálculo correspondiente, puesto que, para este ejemplo, las secciones de las columnas resistieron la sobrecarga, aunque puede que no se presente en todos los casos.

Figura 8. Comparación de área de acero en las columnas



Fuente: Oscar Contreras Bejarano

La figura 8 es una imagen extraída de los resultados del programa SAP2000, los valores que se observan en las columnas corresponden al área de acero en (mm²) que se debe colocar en la sección de concreto. La estructura tanto con el techo verde como con el techo convencional mantiene una misma área de acero, por lo cual, la edificación solo debe ser reforzada en sus elementos estructurales horizontales.

5. Conclusiones

Se modela la red de alcantarillado pluvial del área afectada, considerando la variación del coeficiente de escorrentía con la implementación de los techos verdes, y los niveles de precipitación; en donde se demuestra que la inundación disminuye en función al aumento de los techos verdes implementados.

Se modela un edificio de 5 pisos en la zona de afectación, teniendo en cuenta los parámetros sísmicos del área, en donde se concluye que al sustituir el peso de un techo convencional por el de un techo verde, se conservan las características técnicas de deriva y periodo fundamental de la estructura, aunque a causa de la carga

generada por el techo verde se debe hacer un refuerzo estructural en sus elementos, con una mayor importancia en las vigas de la cubierta, dado que son las primeras en contacto con la nueva carga.

Esta tecnología se convierte en una solución eficiente a problemas de inundación por empozamiento presente en todo el mundo, y además beneficia la calidad del medio ambiente, que en algunas áreas es de gran importancia por la condición ecológica en la que se encuentra. Se recomienda generar este tipo de estudios con diferentes clasificaciones de vegetación y materiales, esto buscando la implementación de techos verdes innovadores en el marco de la sustentabilidad ambiental.

6. Referencias

- E. Oberndorfer, J. Lundholm, B. Bass, R. Coffman, H. Doshi, N. Dunnett. (2007). "Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services". *ProQuest*, 57(10), 823-833.
- El Tiempo. (2015). "Barrios de seis localidades afectados tras fuerte granizada en Bogotá". Consultado el 3 de mayo de 2016 en: <http://www.eltiempo.com/bogota/lluvias-inundaciones-en-bogota/15444935>
- Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático. (2014). "Densidad de eventos de inundación y/o encharcamientos 2010-2015". Bogotá Colombia. Consultado el 14 de febrero de 2014 en: <http://fopae.maps.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=58e2eedafd534dd79dd60cf3d43afbe9>
- R. Heller, C. Psencik. (2014). "Is your building conducive to the installation of a green roof?" *ProQuest*. 30-31.
- Reuters. (2015). El Tiempo. "aumenta a 23 el número de muertos por lluvias e inundaciones en Chile". Consultado el 20 de mayo del 2014 en: <http://www.eltiempo.com/mundo/latinoamerica/inundaciones-en-chile/15500761>

Sobre los autores

- **Óscar Contreras Bejarano**: Estudiante de Ingeniería Civil. ocontreras25@ucatolica.edu.co
- **Paula Andrea Villegas Gonzáles**: Ingeniera Civil, Máster en hidrosistemas. pavillegas@ucatolica.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.