

- **Análisis del cambio en la recarga de acuíferos de la cuenca alta del río Ariporo mediante el modelo de dos tanques de WEAP.**
- **Determinación de la amenaza por flujo de detritos en la cuenca de la quebrada Estaquecá.**
- **Evaluación de metodologías de interacción suelo-estructura aplicadas a la acción simultánea de estructuras adyacentes para cimiento superficial.**
- **Estado del arte sobre el comportamiento estructural de muros delgados que forman parte del sistema de resistencia sísmica de edificaciones.**
- **Análisis de género en el transporte en Bogotá: factores que influyen en el uso del transporte público por parte de las mujeres.**
- **El conocimiento y nosotros: entre el ahora y el antes.**

Enero-marzo de 2022
ISSN 0121-5132
P.V.P. Colombia \$12.000.00



CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

PRESIDENTE JAVIER BOTERO ÁLVAREZ

VOCALES GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS
GONZALO JIMÉNEZ ESCOBAR
ARMANDO PALOMINO INFANTE
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI
RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ
ROBERTO RÍOS MARTÍNEZ
JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS
JAVIER ALBERTO CHAPARRO PRECIADO
(representante de los profesores)
PEDRO PABLO VERGARA NEIRA
(representante de los estudiantes)

RECTOR HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ

SECRETARIA GENERAL CLAUDIA JEANNETH RÍOS REYES

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

DIRECTOR JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

COMITÉ EDITORIAL GERMÁN ACERO RIVEROS
CLAUDIA JEANNETH RÍOS REYES
PAULA XIMENA RÍOS REYES
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS
EDUARDO SARMIENTO PALACIO

DIRECCIÓN EDITORIAL CRISTINA SALAZAR PERDOMO

EDICIÓN **DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**
JORGE CAÑAS SEPÚLVEDA
CORRECCIÓN DE ESTILO
ELKIN RIVERA GÓMEZ
TRADUCCIÓN Y CORRECCIÓN DE ESTILO EN INGLÉS
DAVID PEÑA CITA

DIRECCIÓN COMERCIAL EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Versión digital disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

AUTOPISTA NORTE AK 45 # 205-59
TEL.: (57-1) 668 3600, EXT. 533
revista@escuelaing.edu.co
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA

LA ESCUELA Y LA REVISTA NO SON RESPONSABLES DE LAS IDEAS Y CONCEPTOS EMITIDOS POR LOS AUTORES DE LOS TRABAJOS PUBLICADOS. SE AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS ARTÍCULOS DE LA REVISTA SI SE CITAN LA FUENTE Y EL AUTOR.

5 / EDITORIAL

La ciencia de los datos y la industria 4.0

Wilmer Garzón Alfonso

7-20

Análisis del cambio en la recarga de acuíferos de la cuenca alta del río Ariporo mediante el modelo de dos tanques de WEAP

Gonzalo Alberto Forero Buitrago - Germán Ricardo Santos Granados - Gerald Corzo Pérez

La cuenca del río Ariporo se encuentra localizada en el oriente colombiano, en el departamento del Casanare. En esta región en particular se han producido varios desastres ecológicos, ocasionados por el clima; ejemplo de esto es uno sucedido en el año 2014, cuando ocurrió una fuerte sequía ampliamente divulgada por los medios de comunicación.

21-29

Determinación de la amenaza por flujo de detritos en la cuenca de la quebrada Estaquecá

Ledy Caterine Cerquera Pedraza - Germán Santos Granados - Allen Bateman Pinzón - Vicente César de Medina Iglesias

La quebrada Estaquecá ha evidenciado en las últimas tres décadas una fuerte actividad de eventos de flujos de detritos, lo que ha afectado la infraestructura vial de la zona. En el presente artículo se determina el nivel de susceptibilidad y de amenaza ante flujo de detritos; primeramente, se realiza un inventario de deslizamientos multitemporal para conocer la evolución de la cuenca; se analizan las relaciones de lluvia antecedente y la lluvia de los eventos donde ocurrieron avalanchas, con el fin de establecer un nivel de umbral para la generación de flujos de detritos en la cuenca.

31-51

Evaluación de metodologías de interacción suelo-estructura aplicadas a la acción simultánea de estructuras adyacentes para cimiento superficial

Liliana Camacho Angarita - Jaime Erasmo Garzón Moreno

En este artículo se evalúan las metodologías bajo el modelo de Winkler y la modelación mediante elementos finitos, considerando el problema de la acción de estructuras adyacentes cargadas simultáneamente para placa de cimentación, considerando tres sistemas estructurales (pórticos en concreto, muros de carga y mampostería estructural, para un edificio de cinco pisos).

53-68

Estado del arte sobre el comportamiento estructural de muros delgados que forman parte del sistema de resistencia sísmica de edificaciones

César Mauricio Daza Rodríguez - Nancy Torres Castellanos - Carlos Andrés Blandón Uribe

En este artículo se pretende dar a conocer el estado del arte del comportamiento sísmico de muros delgados de concreto reforzado (CR) mediante una revisión de investigaciones analíticas, numéricas y experimentales, con el fin de evaluar las variables que presentan mayor incidencia en el comportamiento sísmico de los muros y así realizar un valorativo general del sistema estructural.

69-74

Análisis de género en el transporte en Bogotá: factores que influyen en el uso del transporte público por parte de las mujeres

Paula Valentina Perdomo Botello - Mónica Márcela Suárez Pradilla

El objetivo principal de esta investigación es identificar los factores que pueden ser determinantes en la elección modal de transporte público para las mujeres en la ciudad de Bogotá.

Contenido

75-77

El conocimiento y nosotros: entre el ahora y el antes

José Camilo Vásquez Caro

Mi intención en este texto es explorar algunos momentos históricos que forjaron formas de concebir el conocimiento y su propósito para poder explicar el mundo y dar cuenta de él. Estas formas de aproximarnos al conocimiento ordenaron y jerarquizaron diferentes sociedades en diversos momentos.

79 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

La ciencia de los datos y la industria 4.0

WILMER GARZÓN ALFONSO

Director de la Maestría en Ciencia de Datos. Profesor asociado de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería.

wilmer.garzon@escuelaing.edu.co

La industria 4.0, la cuarta renovación industrial, impulsada altamente por la integración de tecnologías como la inteligencia artificial, el aprendizaje automático, el internet de las cosas, la robótica y la automatización, transformará la manera en que operan las industrias para crear nuevas oportunidades.

La ciencia de los datos, un campo interdisciplinario, desempeña un papel clave en la industria 4.0. Mediante la combinación de habilidades matemáticas, estadísticas, de programación y conocimiento del negocio, permitirá analizar grandes volúmenes de datos para identificar patrones y extraer conocimiento a partir de información inasequible para la capacidad humana.

El notable avance tecnológico en los últimos años ha generado un crecimiento acelerado en la colección de datos, provenientes de fuentes como sensores, dispositivos móviles, información financiera y transaccional. Estos datos se pueden procesar en conjunto para optimizar procesos de producción, identificar posibles fallas, descubrir patrones y tomar mejores decisiones, por ejemplo, en campos como los procesos de manufactura, desde el diseño de producto hasta campañas de *marketing*.

La ciencia de datos es un campo relativamente nuevo, que está creciendo con rapidez. Se espera que mientras más y más empresas adopten las tecnologías

de la industria 4.0, la demanda de científicos de datos aumente significativamente. Los científicos de datos beneficiarán a la industria 4.0 mediante la automatización de procesos, optimización de recursos, mantenimiento predictivo o automatización inteligente y robótica; en resumen, promoverán la manufactura inteligente.

Sin embargo, la ciencia de datos también tiene desafíos legales y éticos que hay que tomar en cuenta. La privacidad de los datos, el uso transparente, la seguridad y las consideraciones éticas deben estar latentes, buscando mantener la confidencialidad de los datos.

Las empresas deben estar en capacidad de contribuir desde diferentes aspectos, a causa de los diversos desafíos mencionados en relación con la ciencia de datos en la industria 4.0. Lo ideal es invertir en infraestructura, así como adoptar técnicas emergentes y una tecnología de datos robusta, al igual que propiciar tecnologías emergentes sobre los datos para estar a la vanguardia, alineadas con la cuarta renovación industrial.

Finalmente, hay que capacitar al recurso más importante y valioso: el capital humano. Se le debe dar la oportunidad de capacitarse y formarse en programas que le permitan reducir la brecha tecnológica y contribuir a sacarle el máximo provecho a la ciencia de los datos en la industria.

Análisis del cambio en la recarga de acuíferos de la cuenca alta del río Ariporo mediante el modelo de dos tanques de WEAP

Analysis of aquifer recharge change in the upper Ariporo river basin using a two-tank WEAP model

GONZALO ALBERTO FORERO BUITRAGO¹ - GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS² - GERALD CORZO PÉREZ³

1-2. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería, Grupo de Investigación del Centro de Estudios Hidráulicos.

3. IHE- Delft Institute for Water Education.

gonzalo.forero@mail.escuelaing.edu.co - german.santos@escuelaing.edu.co - g.corzo@un-ihe.org

Recibido: 09/09/2021 Aceptado: 10/10/2021

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

La cuenca del río Ariporo se encuentra localizada en el oriente colombiano, en el departamento del Casanare. En esta región en particular se han producido varios desastres ecológicos, ocasionados por el clima; ejemplo de esto es uno sucedido en el año 2014, cuando ocurrió una fuerte sequía ampliamente divulgada por los medios de comunicación. Para poder plantear una solución al problema de la sequía, es necesario entender el funcionamiento del sistema hidrológico completo de la cuenca alta del río Ariporo.

De acuerdo con lo anterior, se ha elaborado un diseño metodológico en tres fases, relacionadas a continuación:

- Obtener información hidrometeorológica de entrada para la herramienta WEAP y de sensores remotos para el análisis preliminar de la cuenca alta del río Ariporo.
- Construir un modelo hidrológico calibrado utilizando WEAP para la cuenca del río Ariporo, delimitada hasta el punto de medición de caudal del Ideam.
- Analizar el cambio en la recarga de acuíferos para la cuenca alta del río Ariporo mediante el modelo WEAP.

Al analizar los resultados del modelo se pudo comprobar que las sequías extremas, como la registrada en el año 2014, se debieron a una disminución en la lluvia. Al no existir aporte del flujo base ni lluvia para abastecer los sitios de abastecimiento de agua superficial, la sequía se vuelve extrema, situación que hay que estudiar para planear estrategias de prevención de vulnerabilidad a la sequía.

Palabras claves: WEAP, flujo base, recarga de acuíferos, hidrología, ERA5.

Abstract

The Ariporo river basin is in eastern Colombia, department of Casanare. This region has had ecological disasters caused by climate, such as one that happened in 2014 when a strong drought was widely publicized in the media. To propose a solution for the drought problem. Understanding how the entire hydrological system of the upper Ariporo river basin works is required.

In accordance with the above, a three-phase methodological design has been developed as follows:

- To obtain hydro meteorological data as an input for WEAP and remote sensing data to perform an initial analysis of the upper Ariporo river basin.
- To construct a hydrologic calibrated model with WEAP of the Ariporo river basin defined up to the flow measurement point of Ideam.
- To analyze changes in aquifer recharge of the upper Ariporo river basin using the two-tank WEAP model.

The results of the model analysis showed that extreme droughts, such as the one recorded in 2014, were caused by a decrease in rainfall. It is concluded that after a period of two months without rainfall, the base flow contribution to the Ariporo river is minimized. In the absence of base flow and rainfall to supply the surface water supply sites, the drought becomes extreme, a situation that should be analyzed to plan strategies to prevent drought vulnerability.

Keywords: WEAP, base flow, aquifer recharge, hydrology, ERA5, HMS, HEC-RAS.

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país con una variabilidad climática importante, en la medida en que está influenciado por los movimientos del vapor de agua procedentes del océano Atlántico, el océano Pacífico y el Amazonas. La lluvia anual en el país puede variar desde los 8000 milímetros en Chocó hasta los 400 milímetros en Santa Marta, razón por la que se hace necesario hacer análisis con datos históricos del área de trabajo para poder plantear soluciones a la medida del área de estudio.

La cuenca alta del río Ariporo está dedicada a la producción agropecuaria, donde existen limitantes en la producción de biomasa en un lapso largo, de aproximadamente cinco meses al año. Los excesos de lluvia generan condiciones de inundación y la ausencia prolongada de lluvia provoca sequía, disminuyendo así la producción, que a su vez ocasiona pérdidas para los productores.

Además de las pérdidas causadas por el clima, otro factor externo que ocasiona un aumento de los costos de producción de alimentos es el uso de pozos subterráneos utilizando sistemas de bombeo alimentados con combustible fósil. Desde el año 2012 se hizo necesario construir estos pozos para evitar la muerte de animales o cultivos por extrema sequía. Consecuentemente, en el presente artículo se analiza la historia hidrológica de la región para establecer las causas y planear soluciones a partir de los datos de un modelo calibrado de dos tanques de WEAP.

Se elaboró entonces para tal fin un modelo de dos tanques con la herramienta computacional WEAP,

cuyos datos de entrada se descargaron de ERA5; los datos son mensuales en promedio. Los datos de ERA 5 están distribuidos en espacio y tiempo, razón por la que representan una ventaja frente a los datos del Ideam. Las variables descargadas de ERA5, datos usados como entrada para el modelo, fueron los de precipitación, velocidad del viento, evaporación potencial y humedad relativa desde el año 1950 hasta el año 2021.

Este modelo permite tener una aproximación a la interconexión entre los datos de lluvia, evaporación, interflujo, flujo base y caudal.

OBJETIVO

Análisis del cambio en la recarga de acuíferos de la cuenca alta del río Ariporo mediante el modelo de dos tanques de WEAP.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta consiste en una serie de tres fases ordenadas que permiten llegar al resultado esperado.

Las fases se establecen de manera organizada, empezando por la recopilación de información primaria de estaciones de Ideam, de caudal y de lluvia.

La descarga de información del Ideam se hizo desde el portal denominado Dhime, donde se ingresa la variable que se requiere y la ubicación, en este caso de caudal y lluvia; el portal pide la fecha en que se necesita la información, y se descarga un archivo en formato CSV. Esta información de caudal se utiliza para la calibración del modelo.

Adicionalmente, se obtienen datos desde ERA5 para la entrada de datos de la herramienta WEAP mensual a partir del año 1996, fecha en la que el Ideam inicia mediciones de caudal, debido a que se cuenta con la información histórica completa y dentro de los límites de la cuenca.

La descarga de las variables climatológicas se realiza desde la base de datos de Copernicus, con periodicidad mensual para los años y meses que se requieren para el área de estudio. El tipo de datos escogido es NetCFD.

Este archivo NetCFD lo lee directamente la herramienta computacional WEAP.

Se delimita la cuenca, hasta el punto de medición de caudal, y se ingresa la información climatológica de ERA5 en WEAP.

Después de construido el modelo, se ingresan los datos de medición de caudal para proceder a la calibración del modelo con la herramienta PEST, un algoritmo de optimización multiobjetivo que permite cercar automáticamente los datos de salida de caudal del modelo a los datos observados de caudal de la estación del Ideam.

Aparte de la herramienta WEAP, se quiso hacer un análisis en el cambio en la cobertura del suelo con sensores remotos, para lo cual se utilizó la herramienta Qswat plus. Desde el portal de la NASA se descargó MCD12Q1.006 Modis Land Cover Type Yearly Global 500 m para los años 2001 y 2019, y se procesó en Qswat plus para el año 2001, que es el año más antiguo existente para estos datos, y se contrastó con datos del 2019, que es el último año con datos de cobertura del suelo. Se comparan las coberturas de estos dos años para el análisis, lo cual se puede evidenciar en detalle en el capítulo de análisis de resultados.

En la figura siguiente se puede ver el orden de las fases de elaboración del presente artículo en tres fases organizadas de acuerdo con los objetivos específicos que se quieren alcanzar, partiendo de la recopilación de información necesaria para el análisis hidrológico dentro del área de estudio, continuando con la construcción de un modelo con la herramienta WEAP y culminando con el análisis de la recarga de acuíferos en la cuenca alta del río Ariporo (figura 1).

RESULTADOS

Fase 1. Recopilar información hidrometeorológica de entrada para la herramienta WEAP y de sensores remotos para el análisis preliminar de la cuenca alta del río Ariporo.

Análisis de la cobertura del suelo

Información de cobertura del suelo de sensores remotos y la herramienta Qswat plus para poder ver la diferencia en las coberturas entre los años 2001 y 2019.

Para tal fin, se descargaron los archivos de Land Cover Type Yearly Global 500 m para estos dos años, con el objeto de hacer la comparación en el uso de suelo en la cuenca, debido a que 2001 es el año más antiguo que se puede conseguir y 2019 el más actualizado. Se utilizó la banda Land Cover Type 3: Annual Leaf Area Index (LAI) classification, que permite clasificar el uso del suelo en diez clases, dando como resultado un cuadro comparativo entre los años 2001 y 2019 (tabla 1).

Durante el análisis realizado con sensores remotos, se puede evidenciar que el bosque se ha venido disminuyendo gradualmente desde el 2001 hasta el 2019 en 174,8 hectáreas; también se observa una reducción de 224,38 hectáreas en las sabanas y una disminución de 49,58 hectáreas de praderas, debido a los usos rurales que los pobladores le dan al suelo.

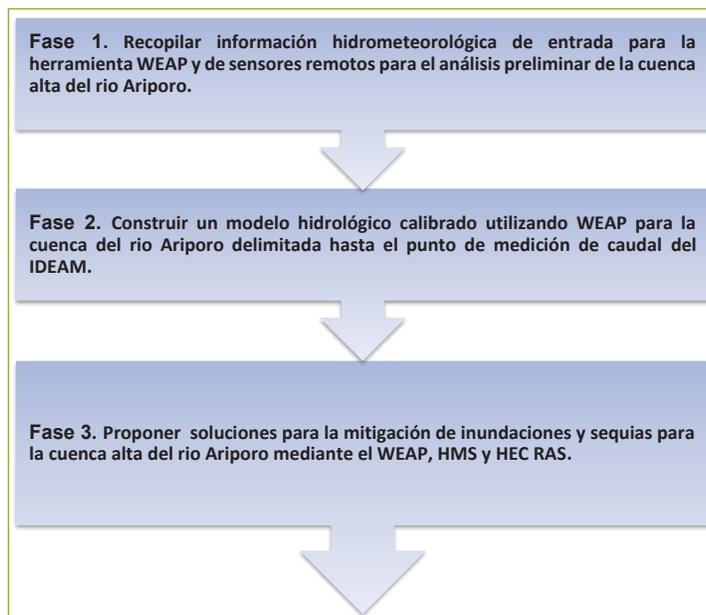


Figura 1. Metodología.

Fuente: Autor.

Tabla 1

Análisis de uso del suelo Qswat plus y MCD12Q1.006 Modis Land Cover Type Yearly Global 500 m para los años 2001 y 2019

Cobertura en hectáreas	Año 2001 Hectáreas	Año 2019 Hectáreas	Análisis
FOEB: Bosques latifoliados perennes: dominados por latifoliadas perennes y palmeras (dosel >2 m). Cobertura arbórea >60 %.	17.940,33	17.765,53	En el año 2001 había 174,8 hectáreas más de bosque en la cuenca alta del río Ariporo.
SAVA: Sabanas entre 10-60 % de cobertura arbórea (>2 m).	33.333,28	33.557,66	En el año 2001 había 224,38 hectáreas menos de sabana en la cuenca alta del río Ariporo.
GRAS: Praderas dominadas por herbáceas anuales (<2 m), incluidas las tierras de cultivo de cereales.	107,52	57,94	En el año 2001 había 49,58 hectáreas más de praderas en la cuenca alta del río Ariporo.

Análisis de la granulometría del suelo

En el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) hay un levantamiento de información de suelos del país, donde una capa permite visualizar la granulometría del suelo. Esto es importante en la medida en que mientras el grano es más grueso o de mayor tamaño, el tamaño entre los poros permite una mayor infiltración de agua lluvia a los acuíferos subterráneos; por lo tanto, si se quisieran identificar áreas de interés para maximizar la infiltración de agua para recarga de acuíferos, serán las áreas en amarillo, que tienen textura gruesa, donde se pueden planificar usos del suelo que permitan la máxima infiltración de agua lluvia en la cuenca.

Después de medir el área con textura gruesa con QGIS se concluyó que 104.064,504 hectáreas son

de textura gruesa, con aproximadamente el 40 % de contenido de arenas en su tamaño de partícula, lo cual indica que son suelos adecuados para la infiltración y recarga de acuíferos; por lo tanto, se recomienda a los tomadores de decisiones que planeen el uso del suelo en esta región para maximizar la infiltración de agua en la temporada de lluvias (figura 2, color amarillo).

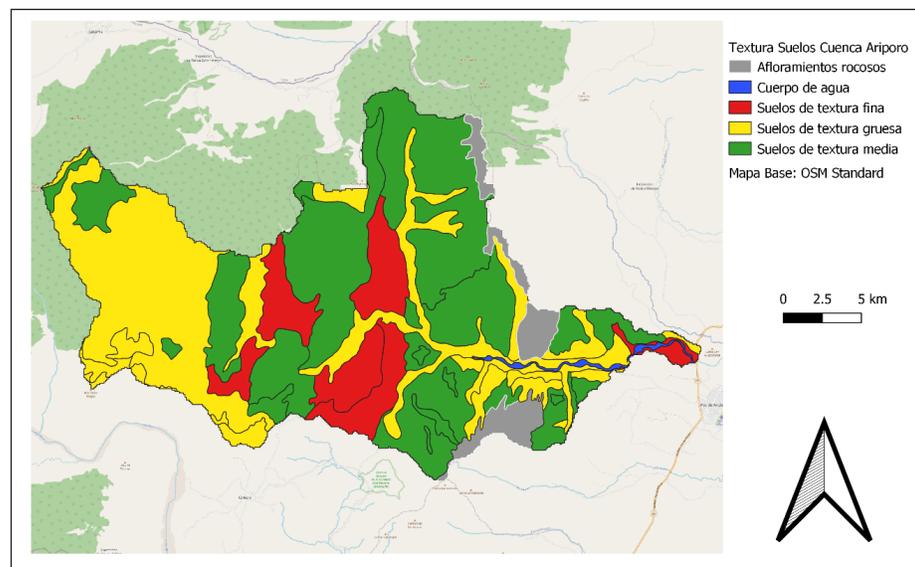
Análisis preliminar de series de datos Ideam

Se realiza un gráfico por estaciones para verificar la existencia de todos los datos y los que hacen falta, como se puede evidenciar en las figuras siguientes (figuras 3 y 4).

Al descargar los datos del portal oficial del Ideam, denominado Dhime, para la cuenca alta del río Ariporo

Figura 2. Grupos texturales de suelos de la cuenca alta del río Ariporo.

Fuente: IGAC.



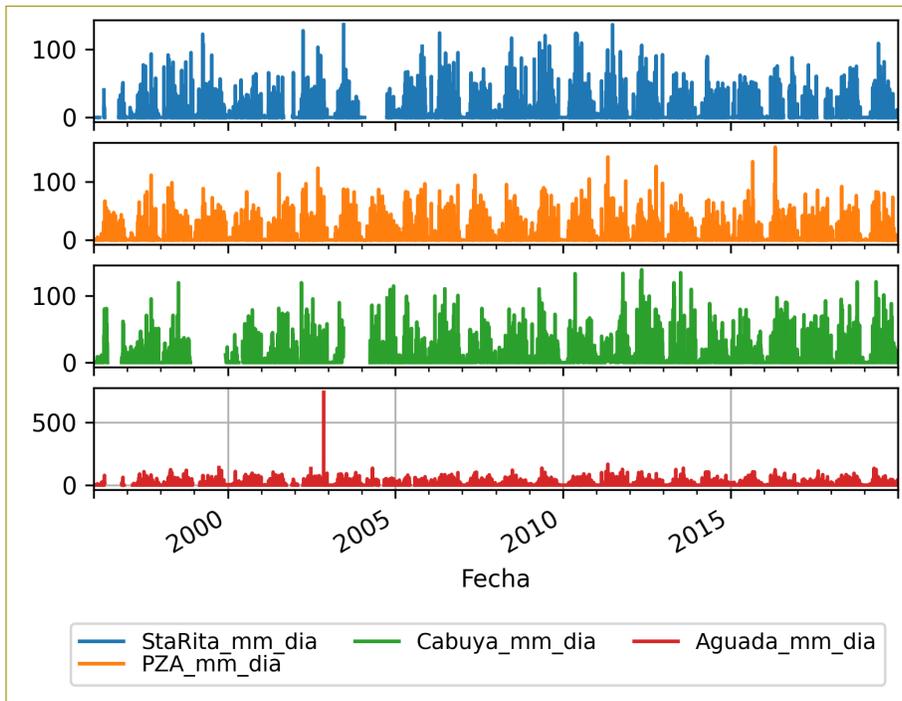
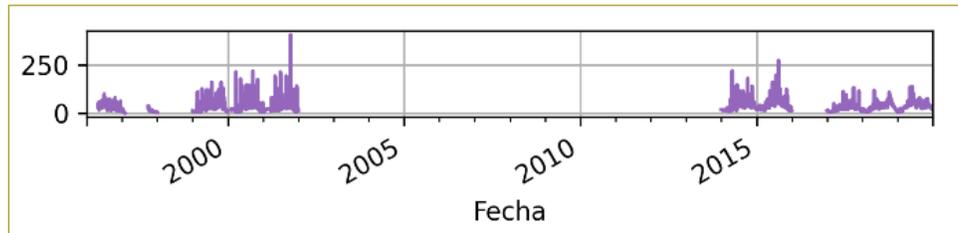


Figura 3. Gráfico de datos existentes de lluvia diaria. Estaciones del Ideam.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Gráfico de datos existentes de caudal medio diario en metros cúbicos por segundo. Estación Paz de Ariporo del Ideam.

Fuente: Elaboración propia.



existe una sola estación con datos de caudal. Se trata de la estación con código 36017010, que tiene datos desde el año 1996. Sin embargo, los datos no están completos. Hacen falta datos de caudal para los años 1998, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013, para un total de trece años de datos faltantes (figura 4).

Al no tener esta información de caudal se hace necesario utilizar una herramienta que permita calibrar los datos de lluvia a los datos de caudal existentes, con el fin de completar la serie de datos faltantes para estos trece años de caudal.

En la figura anterior se evidencian los trece años en la estación de caudal de Paz de Ariporo, así como también los datos mínimos del año 1997. Se resalta el 2014 debido a que fue el año de la sequía extrema. Igualmente, vemos que los datos de caudal no son en extremo bajos, debido a que el 2011 fue un año de

lluvia extremadamente alta (figuras 5 y 7). A partir de este año empieza a disminuir la cantidad de lluvia, hasta alcanzar el mínimo en el año 2015; como el análisis varía mes a mes, es posible ver cómo los datos de caudal para este año crítico fueron bajos precisamente en los meses de baja precipitación (noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo), ocasionando una temporada seca prolongada.

Para el análisis de datos, se usó la biblioteca Pandas, donde mediante el comando Groupby fue posible agrupar y analizar los datos a distintas escalas de tiempo. En la figura siguiente se puede apreciar el comportamiento anual de todas las estaciones de lluvia, entre las cuales la estación de La Aguada (de color rojo en el gráfico) es la única estación que se acerca a los 3000 milímetros al año. Así mismo, se puede evidenciar el pico del fenómeno de la Niña, mencionado anteriormente, en el año 2011 (figura 5).

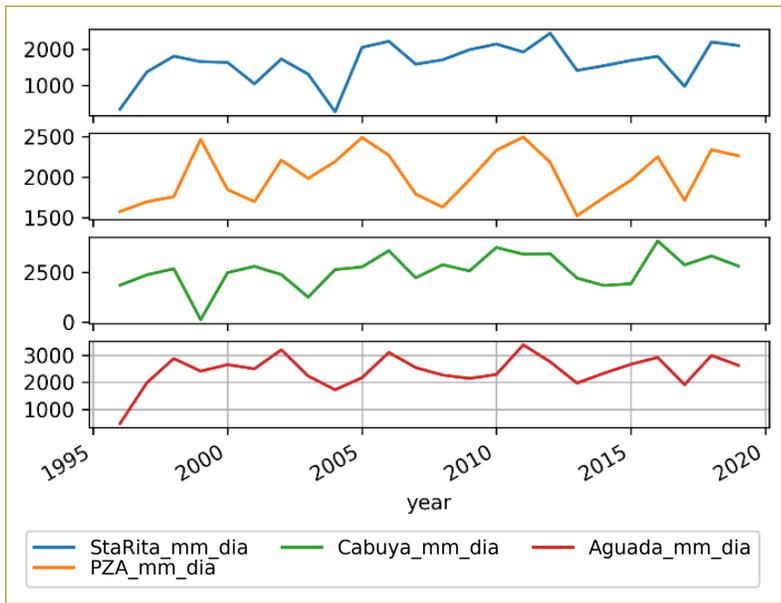


Figura 5. Precipitación anual en las estaciones de lluvia.

Fuente: Elaboración propia.

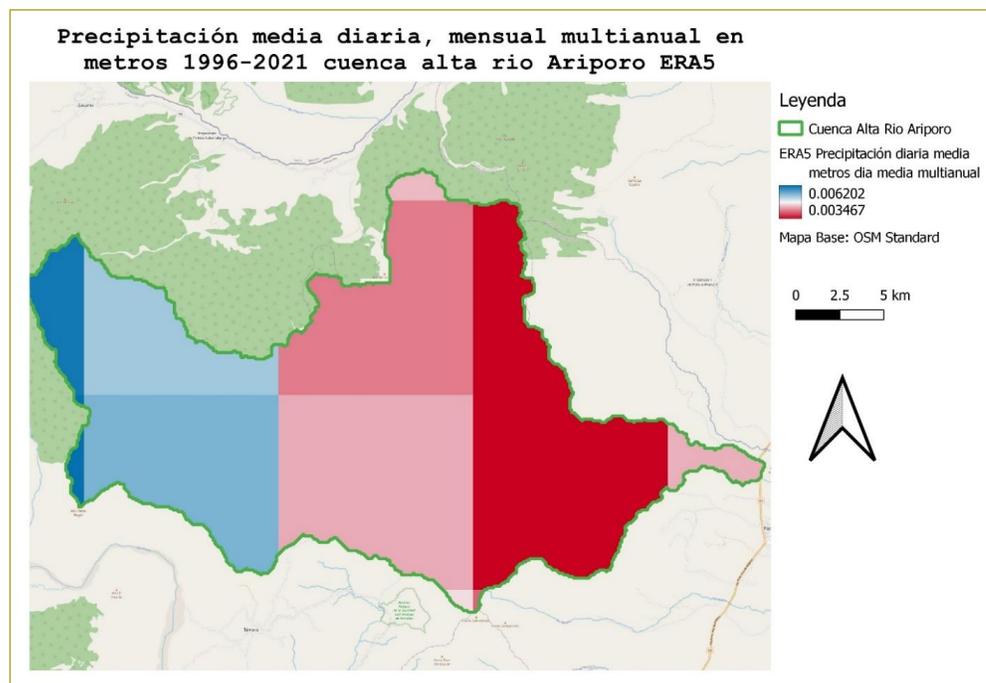


Figura 6. Precipitación ERA5. Valor medio diario en metros (1996-2021).

Fuente: ERA5.

Análisis de las series de datos ERA5

Para realizar el mapa con la información se utilizó la herramienta Google Earth Engine, que permite tomar toda la información existente del área de interés y sacarle el valor medio a dicha información. El mapa se hizo con el fin de mostrar cuál es la ventaja de utilizar los datos de ERA5, datos que se encuentran distribuidos en espacio y tiempo, como se puede ver en la figura anterior (figura 6), en la que los valores de precipitación son más altos en la cuenca alta (datos de color azul y los valores

de precipitación más bajos en rojo en la cuenca baja. Estos valores se dan en metros de agua al día, como valor medio de todos los datos.

La figura siguiente corresponde a un agrupamiento de los datos de manera anual, que arroja un valor medio diario anual, donde fácilmente es posible visualizar años de lluvia extremadamente alta, como el 2011, al igual que años donde la lluvia fue extremadamente baja, como lo es el año 2015 (figura 7).

En esta figura se puede corroborar cómo en la cuenca alta del río Ariporo, donde ocurrieron tragedias ambientales por la mortandad elevada de animales en los años 2014 y 2015, hubo valores bajos de precipitación, razón por la que se debe hacer un llamado a la planificación de usos del suelo en la cuenca, de manera que permita maximizar la infiltración de agua lluvia y contar con reservas de agua subterránea cuando exista un año extremadamente seco. Sin embargo, estas estructuras deben realizarse con un excelente diseño, en el que se tome en cuenta la posibilidad de un año extremadamente lluvioso, como lo fue el año 2011.

Al hacer el análisis agrupado anual de la temperatura, es posible ver que en el año 2011, que fue en extremo

lluvioso (figura 7), la temperatura tuvo un valor mínimo en la media anual (figura 8), mientras que en los años secos, como 2014 y 2015, hubo un periodo con máximos locales en los datos, lo cual nos indica que la lluvia en la región obedece a datos de temperatura bajos en la media anual.

Igualmente, se pueden ver los datos medios agrupados por año para la evaporación potencial (figura 9), y los mínimos locales en 1999 y 2011; así mismo, tenemos para los mismos años máximos locales de precipitación (figuras 7 y 9). Por el contrario, para 2001 y 2007 se tienen máximos locales en evaporación potencial y mínimos locales en la precipitación (figuras 7 y 9).

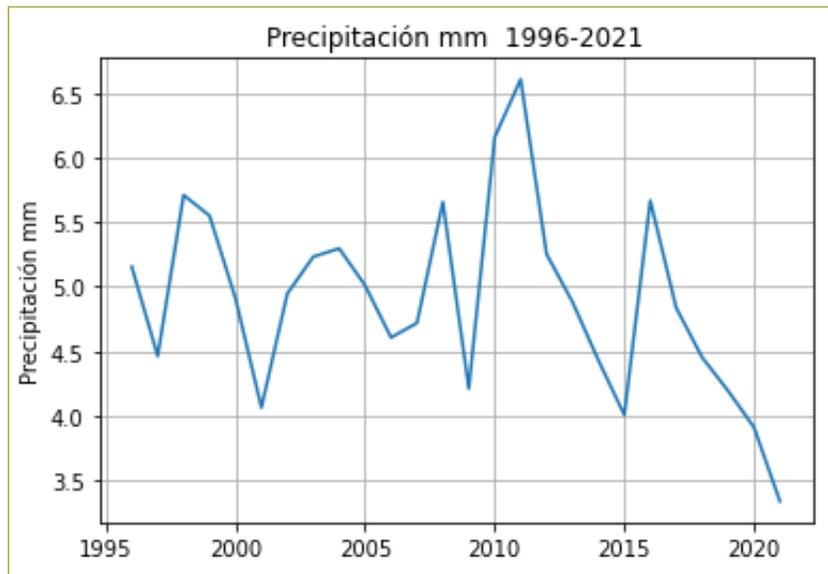


Figura 7. Precipitación en milímetros diarios, promedio anual 1996-2021. Fuente: ERA5.

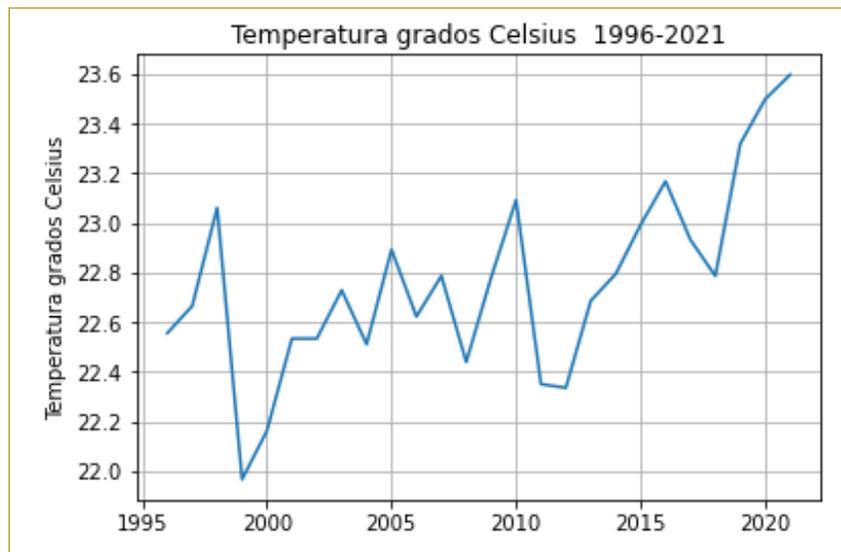
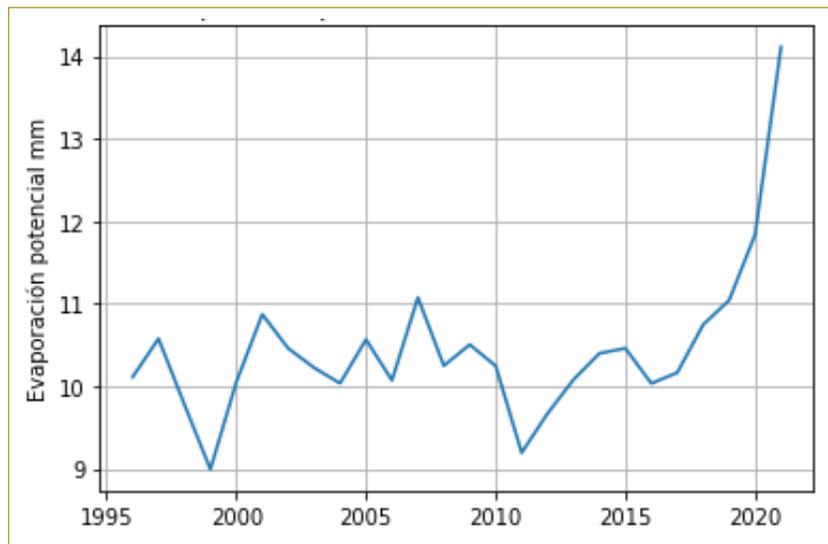


Figura 8. Temperatura media diaria anual (1996-2021). Fuente: ERA5.

Figura 9. Evaporación potencial en milímetros, promedio anual diario 1996-2021.

Fuente: ERA5.



Fase 2. Construir un modelo hidrológico calibrado utilizando WEAP para la cuenca del río Ariporo, delimitada hasta el punto de medición de caudal del Ideam.

El modelo hidrológico de WEAP es un modelo semi-distribuido, ya que una unidad hidrológica es una cuenca o subcuencas. La suma del área de las subcuencas da la suma del área de la cuenca completa. Este modelo permite obtener evapotranspiración, escorrentía, interflujo, flujo base y caudal, mediante un modelo de humedad del suelo que utiliza dos tanques.

WEAP es el *software* principal utilizado para el presente estudio, con el fin de poder entender el funcionamiento del sistema hidrológico de la cuenca alta del río Ariporo en un histórico de tiempo de más de 20 años. La idea es, entonces, realizar el modelo y calibrarlo para poder comprender lo que ha sucedido en el transcurso de esa ventana temporal en la interacción entre el agua superficial y el agua subterránea. El modelo se describe detalladamente en la siguiente sección.

La herramienta WEAP tiene dos métodos de cálculo. Para el presente estudio se utilizó el más completo, denominado método de humedad del suelo, que es una técnica unidimensional de dos tanques. Este modelo cuenta con dos subsistemas de tanques, donde cada uno tiene entradas y salidas. La salida de un tanque puede ser la entrada del siguiente. Los datos obtenidos incluyen evapotranspiración, escorrentía, interflujo, flujo base y caudal (Stockholm Environment Institute, 2021).

Las entradas y salidas de los dos tanques permiten establecer las relaciones entre las variables hidrológicas del sistema.

Las variables de decisión que influyen dentro de las ecuaciones de los tanques y que son objeto de la calibración con el módulo Pest, se describen en detalle más adelante con sus límites iniciales (Stockholm Environment Institute, 2021):

El modelo hidrológico es un modelo de dos tanques, donde cada tanque tiene su ecuación para el balance de masa, de la siguiente manera:

Ecuación tanque superior o tanque 1:

$$\begin{aligned} Rd_j = \frac{dz_{1,j}}{dt} = & Pe(t) - PET(T) K_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,2}^2}{3} \right) \\ & - Pe(t) z_{1,j}^{RRF_j} - f_j K_{s,j} z_{1,j}^2 \end{aligned} \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

$$Rd_j = \frac{dz_{1,j}}{dt} \quad (\text{ecuación 2})$$

$z_{1,j}$ = Almacenamiento relativo de agua dado como una fracción del total del almacenamiento efectivo para la zona de raíces en mm por fracción de uso del suelo; tiene en cuenta la precipitación, la evapotranspiración y el interflujo).

R_{d_j} = Almacenamiento efectivo de agua lluvia en mm por cada fracción de las distintas de suelo j .

d_{z_1} = Cambio en el almacenamiento de agua en el tanque; j se refiere a un instante de tiempo, dentro de un intervalo de tiempos dt .

$Pe(t)$ = Precipitación efectiva, incluyendo riego y derretimiento de nieve.

$$PET(T) K_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,2}^2}{3} \right)$$

(evapotranspiración) (ecuación 3)

PET = Potential Evapotranspiration. Cálculo del cultivo de referencia. *Handbook of hydrology* (1993), sección 4.15, ecuación 4.2.31. Penman-Monteith. Modificada para un cultivo de césped de 0,12 metros de altura.

K_c (coeficiente de cultivo en relación con el cultivo de referencia). Varía según el periodo vegetativo.

$$Pe(t)z_{1,j}^{RRF_j}$$

(escorrentía superficial) (ecuación 4)

RRF_j = Factor de resistencia a la escorrentía ocasionado por la cobertura del suelo. Valores altos de RRF implican menores valores de caudal como resultado en el tiempo j .

$$f_j K_{s,j} z_{1,j}^2$$

(flujo intermedio interflujo) (ecuación 5)

f_j = Coeficiente que divide el flujo superficial en vertical u horizontal, dependiendo del tipo de suelo y la cobertura del suelo en el tiempo j .

K_{s_j} = Valor estimado de la conductividad del suelo en la zona de las raíces cuando está saturado de agua (mm/tiempo), en el tiempo j .

$$(1 - f_j) k_{z,j} z_{1,j}^2$$

(ecuación 6)

Ecuación tanque inferior o tanque 2 (Stockholm Environment Institute, 2021):

$$S_{\max \frac{dz_2}{dt}} = \left(\sum_{j=1}^N (1 - f_j) K_{s,j} z_{1,j}^2 \right) - K_{s2} z_2^2$$

(ecuación 7)

Donde:

$S_{\max \frac{dz_2}{dt}}$ = Almacenamiento del tanque inferior. Puede ser negativo o positivo.

$$\left(\sum_{j=1}^N (1 - f_j) K_{s2,j} z_{2,j}^2 \right)$$

(percolación) (ecuación 8)

$$K_{s2} z_2^2$$

(flujo base o agua subterránea que sale al río)
(ecuación 9)

Para entender mejor el sistema, se resumen las entradas y salidas de la siguiente manera:

- Entradas del tanque 1 = Precipitación, nieve derretida.
- Salidas tanque 1: Evapotranspiración, escorrentía superficial, escorrentía directa, percolación.
- Entradas tanque 2: Percolación. Salidas tanque 2: Flujo base.

El modelo completo con entradas y salidas se puede ver más adelante (figura 10).

Dos de las grandes ventajas que tiene WEAP sobre las demás herramientas computacionales son las siguientes:

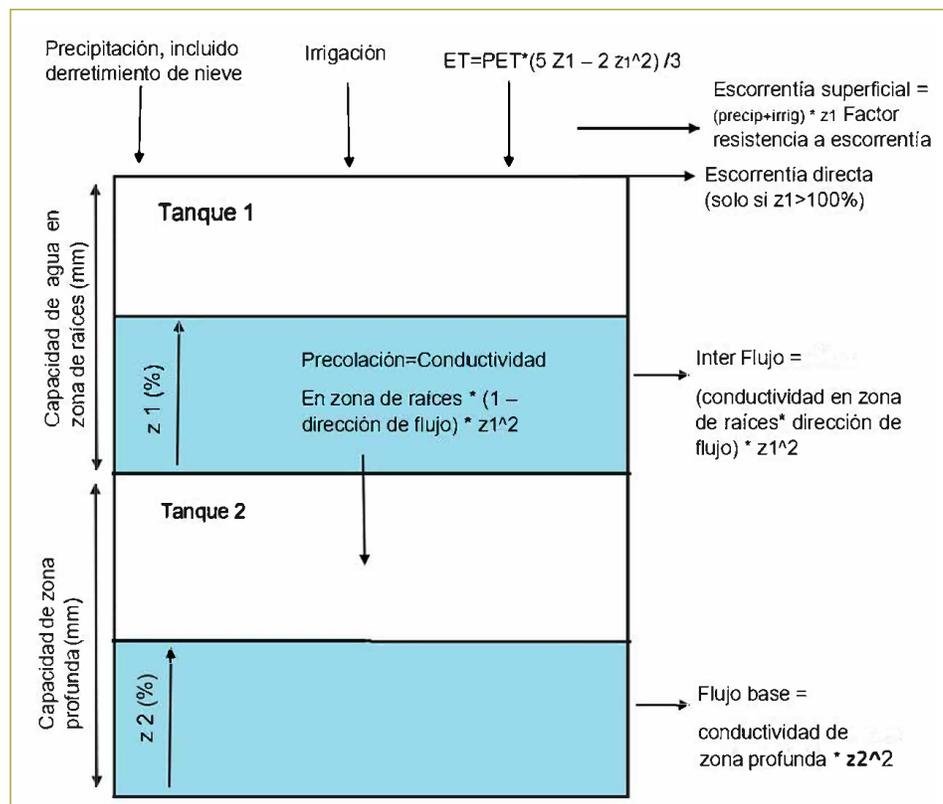
- El modelo de dos tanques permite obtener datos de la relación entre la precipitación, el caudal y lo que sucede en la parte subterránea.
- La herramienta WEAP permite leer datos de precipitación distribuidos en el espacio y el tiempo, así como insertar para la calibración del modelo las series de caudal del Ideam.

El modelo de la herramienta WEAP utiliza nueve variables de decisión. Se describe cada una de ellas, además de indicar cual es el valor al inicio de la simulación, es decir, sin calibrar (Stockholm Environment Institute, 2021):

Una variable de decisión es una variable implícita dentro de un modelo matemático que influye sobre

Figura 10. Modelo de dos tanques WEAP.

Fuente: Stockholm Environment Institute, 2021.



el resultado de la operación matemática. El modelo de humedad del suelo de WEAP tiene dos ecuaciones matemáticas: una para el tanque superior y otra para el tanque inferior. Dichas ecuaciones cuentan con nueve variables de decisión, cada una de las cuales influye sobre el resultado final o caudal simulado.

A renglón seguido, se describe cada una de las nueve variables de decisión; además de esto, se pone después del signo = el valor inicial por defecto que tiene la herramienta WEAP, con la finalidad de verificar el cambio en este valor después de la calibración del modelo.

- K_c (coeficiente de cultivo en relación con el cultivo de referencia). Varía según el periodo vegetativo = 0,1. Este parámetro controla los valores de la evapotranspiración.
- Soil Water Capacity (capacidad efectiva de retención del agua en el suelo en el tanque superior). Controla qué tan rápido se mueve el agua sobre la superficie del terreno = 5.
- Deep Water Capacity (capacidad de almacenamiento del tanque inferior). Este valor es ignorado si se tiene un escurrimiento/infiltración, en conexión

con un módulo de agua subterránea. Controla qué tan rápido se mueve el agua sobre la superficie del terreno = 10.

- Deep Conductivity (conductividad profunda). Se refiere a la velocidad de flujo en estratos profundos. Este parámetro controla qué tan rápido se mueve el agua sobre la superficie del terreno = 100.
- Run off Resistance Factor (RRF). Controla la respuesta a la escorrentía superficial. Puede aumentar o disminuir el valor de la percolación. Se relaciona con un índice foliar, la pendiente del terreno y el tipo de suelo; se modifica si se quiere aumentar los picos en el caudal = 0.
- Root Zone Conductivity. Tasa de conductividad hidráulica a saturación plena en la zona radicular del tanque superior cuando el almacenamiento relativo es $z_1=1$. Controla qué tan rápido se mueve el agua en la zona de profundidad desde la superficie hasta la zona radicular, que a su vez influye en cómo se mueve el agua sobre la superficie del terreno. Se modifica si se quiere aumentar los picos en el caudal = 300.
- Preferred Flow Direction (1=100 % flujo horizontal; 0=100 % flujo vertical). Divide el caudal que sale

de la zona de las raíces del tanque superior entre el inter flujo y la infiltración al tanque inferior. Controla qué tan rápido se mueve el agua sobre la superficie del terreno = 1.

- Initial Z1 (valor inicial al principio de la simulación) = 80, rango de 0 a 100. Indica un porcentaje de almacenamiento inicial del tanque superior de 0 a 100.
- Initial Z2 (valor inicial al comienzo de la simulación) = 80, rango de 0 a 100. Indica un porcentaje de almacenamiento inicial del tanque inferior de 0 a 100.
- Al realizar la simulación del modelo de humedad del suelo de WEAP con estos valores iniciales por defecto de cada una de las variables de decisión, se llega a un resultado de caudal simulado de color rojo, valores que se comparan gráficamente con los valores del caudal observado para todos los años desde 1996 (figura 11).

El proceso de calibración consiste en encontrar los parámetros o variables de decisión del modelo, de manera que la diferencia entre los datos reales observados (estación del Ideam) y los datos simulados sea mínima.

Existen varias métricas para medir el error, como error medio cuadrático, error absoluto, coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), que se describen a continuación:

- **Coficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).** Rango óptimo > 0,5. Mientras más se acerca a 1, más se acerca a los valores reales.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right]$$

(ecuación 12)

$$EA = \left[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \right]$$

Calibración del modelo en WEAP con el algoritmo PEST

Calibración PEST. WEAP incluye un enlace a una herramienta de estimación de parámetros (PEST) que permite al usuario automatizar el proceso de comparar los resultados de WEAP con las observaciones históricas, así como modificar los parámetros del modelo para mejorar su precisión mediante un algoritmo de optimización multiobjetivo. Es posible utilizar PEST para ayudar a calibrar una o más variables en una herramienta WEAP, que puede ser particularmente útil cuando se emplea el método de humedad del suelo de la hidrología de la cuenca, como en este caso. PEST

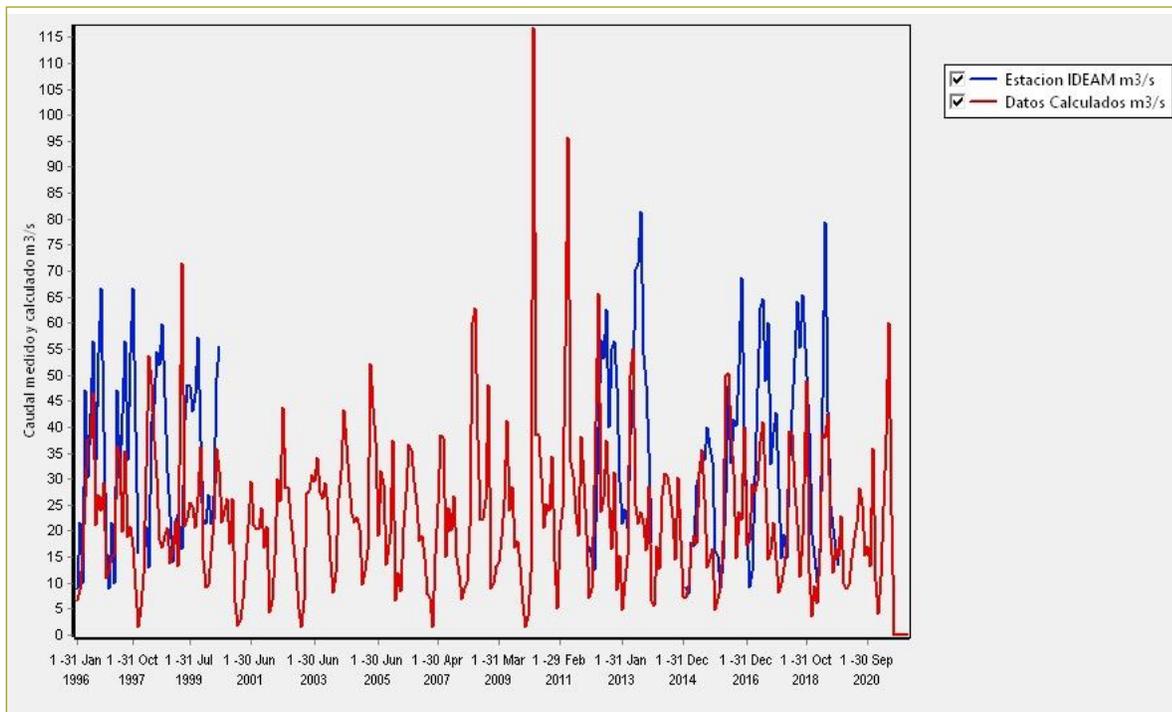


Figura 11. Caudal del Ideam y aadal modelado en WEAP sin calibrar en m³/s.

Fuente: Elaboración propia.

(Parameter ESTimation) es un paquete de *software* gratuito para la estimación de parámetros independientes del modelo y el análisis de incertidumbre (Stockholm Environment Institute, 2021).

Las tres variables de decisión que se pueden emplear para definir los límites inferior y superior para el proceso de calibración en la herramienta PEST son estas:

- Deep Water Capacity.
- Deep Conductivity.
- Initial Z2.

A renglón seguido, se explica cómo se abordó la calibración de estas tres variables revisando dos métricas de error para los resultados obtenidos (la métrica de la sumatoria del error absoluto y la del coeficiente NSE), con la finalidad de seleccionar los valores con menor error.

Deep Water Capacity (capacidad de capa inferior del tanque). El modelo de WEAP tiene dos tanques: uno superior y otro inferior. El tanque superior es de dimensiones más pequeñas, ya que va hasta la profundidad de las raíces, mientras que el tanque inferior representa el acuífero subterráneo con una profundidad desconocida.

- **Deep Water Capacity** tiene un valor de 605 mm antes de la calibración y al final de la calibración queda con un valor de 70 mm.

Fase 3. Proponer soluciones para mitigar las inundaciones y sequías en la cuenca alta del río Ariporo mediante el WEAP, HMS y HEC-RAS.

Embalses de infiltración, VAC systems, diseño en línea clave, soluciones basadas en la naturaleza.

CONCLUSIONES

El flujo base es una variable indispensable de obtener en una cuenca hidrográfica para establecer las reglas de uso del agua en un territorio, ya que su recarga es indispensable para el abastecimiento de las fuentes superficiales en la temporada de estiaje. Si el modelo arroja que existe una menor descarga de flujo base para alimentar el caudal en el presente que en el pasado, es

posible que el aumento en el uso en el agua subterránea en la cuenca no sea sostenible en el tiempo y se deban establecer reglas de optimización de utilización de esta para evitar inconvenientes de sequía a futuro.

Para el caso de la cuenca del río Ariporo, podemos ver que los valores se mantienen en el tiempo, por lo que el consumo de agua subterránea no se considera insostenible en el tiempo (figura 36 de flujo base multianual). Sin embargo, se puede evidenciar la vulnerabilidad de la cuenca a sequías extremas, como la del año 2014, donde el flujo base registró una disminución importante, teniendo para este año un valor mínimo local, razón por la que es necesario realizar una planeación en la cuenca alta para maximizar la infiltración de agua lluvia, de acuerdo con la granulometría del suelo (figura 10), el uso permitido en Pomcas y la geología existente, cuya información no se encuentra fácilmente.

Se debe mejorar en Colombia el acceso a datos libres sobre los acuíferos subterráneos, geología y granulometría para conocer y permitir el estudio de fenómenos y soluciones a la medida para cada región. Para este caso en específico, la idea es enlazar el modelo WEAP a Modflow con la información geológica, de manera que se puedan entender mejor los procesos físicos dentro del modelo hidrológico y así poder tener explicaciones y datos más precisos.

La herramienta WEAP no solo permite realizar fácilmente un modelo hidrológico calibrado con los datos de caudal, partiendo de datos espacialmente distribuidos, sino también completar los datos faltantes. Ofrece, además, la posibilidad de agrupar y analizar la información fácilmente, de manera que es una excelente herramienta para utilizar en los proyectos de modelación hidrológica en el país, como una primera aproximación, sin incluir procesos físicos.

La cantidad y la calidad de datos de caudal deben aumentar en el número de estaciones de medición, así como revisar su operatividad, ya que para el caso de la estación de estudio faltaban trece años de datos y es la única estación en funcionamiento; por tanto, se sugiere mejorar en el control de la operatividad de estas estaciones, con el propósito de tener mejores datos y, con esto, mejores modelos para proteger nuestro recurso hídrico.

Se sugiere a los tomadores de decisión del país realizar un modelo de las cuencas representativas de su territorio, de manera que puedan crear escenarios

simulados con la herramienta WEAP con la finalidad de tomar decisiones basadas en datos para la planeación de todo el territorio.

Es clave poder establecer relaciones entre las variables hidrológicas que arroja el modelo, como la duración en tiempo entre picos, como lo que se hizo entre la lluvia y el flujo base; así mismo, analizar el tiempo que tarda en llegar la sequía para implementar estrategias de control de extremos de inundación o sequía.

La cuenca alta del río Ariporo es una cuenca que posee una respuesta rápida entre los eventos de lluvia, la cual se refleja en los datos de caudal. Con la información que se tiene hasta el momento no es posible definir la causa directa de este comportamiento, por lo que se sugiere profundizar en el tema geológico, de granulometría y de cobertura para aumentar las tasas de infiltración y, a su vez, maximizar la recarga de acuíferos, utilizando sensores remotos para la ubicación de dichas zonas estratégicas dentro de la cuenca.

RECOMENDACIONES

Para la toma de decisiones de planificación de un territorio se hace necesario tener un modelo a la medida basado en datos, que permita planificar el uso del suelo y el uso del agua a partir de un modelo numérico, en el que se recopilen datos como granulometría, geología, coberturas o demandas, y ver de qué modo esto puede influir en el comportamiento del flujo superficial y subterráneo de la cuenca.

Se puede deducir del presente análisis que hay que continuar obteniendo datos externos de la cuenca y sus intervenciones históricas, con el objeto de poder explicar lo que sucede.

Es indispensable que en el futuro sea posible hacer la consulta en detalle de las concesiones para poder proteger de una manera más eficiente el recurso hídrico en el país.

Así mismo, es de suma importancia liberar la información geológica del país, pues difícilmente se puede tener acceso a esta, la idea es continuar investigando las causas y consecuencias, por ejemplo, de los acuíferos, de las formaciones rocosas del subsuelo o de la granulometría del subsuelo, y cómo esto influencia directamente la respuesta entre la lluvia y el caudal en una cuenca.

Es indispensable la inclusión de datos semidis-tribuidos en las nuevas herramientas de modelación

hidrológicas, ya que esto permite tener datos en todos los sitios de interés, lo que normalmente es complejo en estaciones de medición en tierra. Sería una gran contribución a la mejora en la representación de la realidad de un sistema hidrológico regional.

Se debe mejorar en Colombia el acceso a datos libres sobre los acuíferos subterráneos, geología y granulometría, para conocer y permitir el estudio de fenómenos y soluciones a la medida para cada región.

La cantidad y la calidad de datos de caudal deben aumentar en el número de estaciones de medición, así como revisar su operatividad, ya que para el caso de la estación de estudio faltaban trece años de datos y es la única estación en funcionamiento; por tanto, se sugiere mejorar en el control de la operatividad de estas estaciones con el fin de poder tener mejores datos y, con esto, mejores modelos para proteger nuestro recurso hídrico.

Se sugiere realizar el estudio con un modelo distribuido, además de hacer la corroboración de datos entre el Ideam y los pixeles de ERA 5 de manera agregada, para poder estimar los posibles errores en los datos, además; de esto, hay que estudiar los datos de caudal de ERA 5 y revisar su veracidad, con el objeto de utilizar este tipo de datos donde no existe información de caudal en el país.

Agradecimientos

Infinitas gracias a la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, ya que es un espacio de aprendizaje práctico para el trabajo.

REFERENCIAS

- Amaranto, A., Muñoz-Arriola, F., Corzo, G., Solomatine, D. P., & Meyer, G. (2018). Semi-seasonal groundwater forecast using multiple data-driven models in an irrigated cropland. *Journal of Hydroinformatics*, 20(6), 1227–1246. <https://doi.org/10.2166/hydro.2018.002>.
- Araujo, H. F. P. d., Machado, C. C. C., Pareyn, F. G. C., Nascimento, N. F. F. d., Araújo, L. D. A., Borges, L. A. d. A. P., Santos, B. A., Beirigo, R. M., Vasconcellos, A., Dias, B. de O., Alvarado, F., & Silva, J. M. C. da (2021). A sustainable agricultural landscape model for tropical drylands. *Land Use Policy*, 100(March 2020), 104913. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104913>.
- Baiamonte, G. (2019). SCS Curve Number and Green-Ampt Infiltration Models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(10), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001838](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001838).
- Ben, G.J.S., Sonneveld, B., Merbis, M.D., Unver, O. (2018). Nature-Based Solutions for agricultural water management and food

- security. *FAO Land and Water Discussion Paper* (Issue December). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10614.86082>.
- Bizhanimanzar, M., Leconte, R., & Nuth, M. (2019). Modelling of shallow water table dynamics using conceptual and physically based integrated surface-water-groundwater hydrologic models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(5), 2245–2260. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2245-2019>.
- DANE (2020). *Geoportal del DANE. Geovisor Censo Nacional Agropecuario*. Censo Nacional Agropecuario. <https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/economia/censo-nacional-agropecuario>.
- Dassargues, A. (2019). Hydrogeology: Groundwater Science and Engineering. In CRC Press (ed.), *Groundwater* (vol. 57, Issue 3). Taylor and Francis.
- Dhime, I. (2020). *Dhime - Ideam - Ideam*. Descarga de datos Hidrometeorológicos. http://www.ideam.gov.co/inicio?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_assetEntryId=72968944&_101_type=content&_101_urlTitle=dhime
- Dinero, R. (2014). *Tragedia ambiental en el Casanare*. <https://www.dinero.com/pais/articulo/tragedia-ambiental-casanare/199407>.
- FAO (2020). *Integrated agriculture-aquaculture: A primer*. VAC SYSTEMS. <http://www.fao.org/3/Y1187E/y1187e10.htm>.
- Farrag, M., Pérez, G. C., & Solomatine, D. (2019, January). Experiments with a conceptual distributed hydrological model: impact of cell size, parameter regionalization and routing method. *Geophysical Research Abstracts* (vol. 21).
- Herman, M. R., Hernández-Suárez, J. S., Nejadhashemi, A. P., Kropp, I., & Sadeghi, A. M. (2020). Evaluation of Multi-And Many-Objective Optimization Techniques to Improve the Performance of a Hydrologic Model Using Evapotranspiration Remote-Sensing Data. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(4), 1–15. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001896](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001896).
- Ideam (2019). *Cambio de la superficie cubierta por bosque natural*. ARCHIVOS RELACIONADOS - CAMBIO DE LA SUPERFICIE CUBIERTA POR BOSQUE NATURAL - IDEAM. Cambio En La Cobertura de Bosques En Colombia. <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/cambio-de-la-superficie-cubierta-por-bosque-natural>.
- Ideam (2020). *DEFORESTACIÓN EN COLOMBIA - IDEAM*. Deforestación En Colombia. <http://www.ideam.gov.co/web/bosques/deforestacion-colombia>.
- Li, Z., Liu, P., Feng, M., Cui, X., He, P., Wang, C., & Zhang, J. (2020). Evaluating the Effect of Transpiration in Hydrologic Model Simulation through Parameter Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(5), 1–17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001895](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001895).
- Majidi, B., Hemmati, O., Baniardalan, F., Farahmand, H., Hajitabar, A., Sharafi, S., ... & Manzuri, M. T. (2021). Geo-spatiotemporal intelligence for smart agricultural and environmental eco-cyber-physical systems. *Enabling AI Applications in Data Science* (pp. 471-491). Springer, Cham.
- Mehrnegar, N., Jones, O., Singer, M. B., Schumacher, M., Bates, P., & Forootan, E. (2020). Comparing global hydrological models and combining them with Grace by dynamic model data averaging (DMDA). *Advances in Water Resources*, 138, 103528. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103528>.
- Mohammadzadeh-Habili, J., & Khalili, D. (2020). Assessment of Artificial Recharge Dams and Improvement of Their Groundwater-Recharge Capacity. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001909](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001909).
- Peter, B. G., Mungai, L. M., Messina, J. P., & Snapp, S. S. (2017). Nature-based agricultural solutions: Scaling perennial grains across Africa. *Environmental Research*, 159 (December 2016), 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.011>.
- Uribe, N. & Corzo, G. (2020). *Spatio temporal visualization of soil critical sources areas to assess the dynamics of source pollution in agricultural management practices*. 103434.
- Uribe, N., Corzo, G., Quintero, M., Van Griensven, A., & Solomatine, D. (2018). Impact of conservation tillage on nitrogen and phosphorus runoff losses in a potato crop system in Fquene watershed, Colombia. *Agricultural Water Management*, 209(July), 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.006>.
- Xu, Q., Zhao, K., Liu, F., Peng, D., & Chen, W. (2021). Effects of land use on groundwater recharge of a loess terrace under long-term irrigation. *Science of the Total Environment*, 751, 142340. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142340>.
- Zeinali, M., Azari, A., & Heidari, M. M. (2020). Multiobjective Optimization for Water Resource Management in Low-Flow Areas Based on a Coupled Surface Water-Groundwater Model. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(5), 1–15. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001189](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001189).
- Zhang, M., Zhang, J., & Song, Y. (2019). Preliminary Research and Application of MIKE SHE Model in Jialingjiang River Basin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 304(2). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/2/022088>.

Determinación de la amenaza por flujo de detritos en la cuenca de la quebrada Estaquecá

Determination of debris flow hazard in the Estaquecá stream basin

LEYDY CATERINE CERQUERA PEDRAOS¹ - GERMÁN SANTOS GRANADOS² - ALLEN BATEMAN PINZÓN³ - VICENTE CÉSAR DE MEDINA IGLESIAS³

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Profesor titular de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería.

3. Universidad Politécnica de Cataluña.

leydy.cerquera@mail.escuelaing.edu.co - german.santos@escuelaing.edu.co

Recibido: 12/09/2021 Aceptado: 15/10/2021

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

La quebrada Estaquecá ha evidenciado en las últimas tres décadas una fuerte actividad de eventos de flujos de detritos, lo que ha afectado la infraestructura vial de la zona. En el presente artículo se determina el nivel de susceptibilidad y de amenaza ante flujo de detritos; primeramente, se realiza un inventario de deslizamientos multitemporal para conocer la evolución de la cuenca; se analizan las relaciones de lluvia antecedente y la lluvia de los eventos donde ocurrieron avalanchas, con el fin de establecer un nivel de umbral para la generación de flujos de detritos en la cuenca. Así mismo, se determina el nivel de susceptibilidad de deslizamientos de acuerdo con el método estadístico bivariado por pesos de evidencia, el cual requiere como insumo un inventario de deslizamientos y una serie de mapas con los factores condicionantes que hay que evaluar. Luego de establecer las zonas con vulnerabilidad alta a deslizamientos, finalmente se procede a modelar cómo estas áreas se propagan sobre el cauce, para lo cual se hace uso del modelo DebrisDice para definir el nivel de amenaza de manera cualitativa.

Palabras claves: flujo de detritos, amenaza, susceptibilidad, lluvia acumulada, lluvia evento, umbral.

Abstract

The Estaquecá stream has shown a strong debris flow activity in the last three decades, affecting the road infrastructure in the area. This document determines the level of susceptibility and hazard to debris flows. First, a multitemporal landslide inventory is made to know the evolution of the basin; the relationships of antecedent rainfall and the rainfall of the events where avalanches occurred are analyzed to establish a threshold level for the generation of debris flows; likewise, the level of landslide susceptibility is determined according to the bivariate statistical method by weights of evidence, which requires a landslide inventory and a series of maps with the conditioning factors to be evaluated as input. After establishing the areas with high susceptibility to landslides, the final step is to model how these areas spread over the riverbed, using the DebrisDice model to establish the level of hazard in a qualitative manner.

Keywords: debris flow, hazard, susceptibility, accumulated rainfall, event rainfall, threshold.

INTRODUCCIÓN

El flujo de avalanchas es uno de los desastres naturales más importantes en Colombia, pues a lo largo y ancho del territorio nacional se ha evidenciado la ocurrencia de eventos de gran magnitud, que han ocasionado la pérdida de vidas humanas y pérdidas económicas; sin embargo, este fenómeno no se ha estudiado ni diagnosticado lo suficiente en algunas zonas, pues existen sitios con un alto grado de amenaza ante el flujo de detritos, donde no se tienen estudios previos para la valoración de la amenaza ante estos eventos.

Ese es el caso de la quebrada Estaquecá, localizada en el piedemonte llanero, específicamente en el municipio de Quetame, la cual ha evidenciado en las últimas tres décadas una fuerte actividad de este fenómeno, que ha afectado la infraestructura vial de la zona, más exactamente el puente del PR46+100 de la vía Bogotá-Villavicencio, donde se han generado daños en la infraestructura vial que han producido cierres viales y, por ende, pérdidas económicas en los ámbitos local y regional, ya que esta es una de las vías más importantes del país, pues comunica la parte oriental con la capital de la república.

A lo largo de este artículo se pretende determinar el nivel de susceptibilidad y de amenaza ante flujo de detritos en la cuenca de la quebrada Estaquecá de una manera cualitativa, como un aporte al conocimiento de la cuenca, la planificación territorial y la gestión del riesgo en la zona; por lo anterior, se hizo un análisis multitemporal de fotografías aéreas e imágenes satelitales, se estimó un nivel umbral de precipitación para la generación de flujos de detritos en la cuenca y se determinó el nivel de susceptibilidad y de amenaza ante flujo de detritos en la cuenca de una manera cualitativa, para tener un mejor entendimiento de los eventos ocurridos en la quebrada.

CASO DE ESTUDIO

La quebrada Estaquecá se localiza en el sector suroriental del departamento de Cundinamarca, más exactamente en el municipio de Quetame, dentro del piedemonte llanero; su desembocadura se da sobre la margen derecha del río Negro, colindando con la vía Bogotá-Villavicencio, específicamente en el puente del PR46+100.

La cuenca cuenta con un área de 12 km² y tiene una longitud de cauce de aproximadamente 6,18 km; entre sus afluentes se encuentran la quebrada Las Lajas y la

quebrada Las Cajitas, que evidencian más problemas de degradación en el cauce, sobre todo esta última. La cuenca tiene una pendiente media del cauce del 25,9 %, lo que representa una pendiente alta, y da capacidad al flujo para erosionar y transportar sedimento.

En cuanto a su geología, la quebrada se localiza en una región sobre vertientes de la cordillera Oriental, donde afloran rocas metamórficas y sedimentarias, encontrando principalmente la formación de filitas y cuarcitas de Guayabetal (PEqgu) (Ingeominas, 2011); esta corresponde a filitas de colores verde y morado, que se encuentra foliada, altamente diaclasada, fracturada y fallada, siendo más propensa a caída de grandes bloques, ya que se trata de rocas metamórficas que se presentan con topografía abrupta de altas pendientes (Cormacarena, 2018).

METODOLOGÍA

El flujo de detritos es un flujo de sedimento y una mezcla de agua como si fuera un fluido continuo, impulsado por la gravedad (Takahashi, 2007). Son flujos con un comportamiento mecánicamente como no newtonianos, es decir, que su relación entre el esfuerzo y la tasa de deformación no es lineal, y tiende hacia el comportamiento de un fluido viscoplástico (Cousset & Meunier, 1996), los cuales han sido estudiados por varios autores (O'Brien et al., 1993; Bregoli et al., 2018; Pierson & Costa, 1987; Dietrich & Montgomery, 1998; Páez Pedraza, 2016).

Este tipo de flujos se producen por el desprendimiento y transporte de partículas gruesas y finas en una matriz de agua, que generalmente se forman en las laderas de una montaña y están asociados a fenómenos regionales dentro de una cuenca de drenaje, aparte de que movilizan grandes volúmenes de material, los cuales alcanzan altas velocidades y tienen un gran poder destructivo (Suárez, 1998).

Por esto, a continuación se describe la metodología desarrollada para determinar la amenaza ante flujos de detritos en la cuenca de la quebrada Estaquecá.

Inventario de deslizamientos e identificación de sitios críticos

Los inventarios de movimientos en masa son la representación de eventos únicos o múltiples, multitempo-

rales, los cuales presentan las inestabilidades de manera específica o zonalmente; es decir que, en el inventario se registra la ubicación como punto o polígono (Servicio Geológico Colombiano, 2017). Los inventarios de movimientos en masa constituyen la base para los análisis de la susceptibilidad, de la amenaza y del riesgo por deslizamientos (Soeters & Van Westen, 1996), así como de la estimación de volúmenes de materiales aportados por dichos procesos (Legorreta Paulín et al., 2014). Estos se pueden construir mediante la compilación de información secundaria como interpretación de imágenes de sensores remotos para aquellas zonas cuyas condiciones de accesibilidad dificultan el levantamiento del inventario en campo, como es el caso de la quebrada Estaquecá, donde debido a sus altas pendientes es difícil hacer este tipo de levantamientos en campo.

Por lo anterior, se decidió hacer el inventario de deslizamientos e identificación de sitios críticos o vulnerables mediante el uso de imágenes satelitales y fotografías aéreas. El inventario de deslizamientos se efectuó después de una cuidadosa selección y análisis de las fotografías aéreas, digitalizando las áreas de deslizamientos activos o inactivos que se detectan en el área, teniendo como producto final un inventario de deslizamientos definidos por polígonos de origen y clasificados con la fecha del evento.

Estimación de la lluvia detonante de flujo de detritos

Para la estimación de la lluvia detonante se utiliza la metodología propuesta por Mayorga (2003), quien establece una correspondencia entre los umbrales de la lluvia acumulada y la susceptibilidad del terreno. Para la estimación de la lluvia acumulada se analizan las precipitaciones ocurridas en los eventos de avalanchas reportados, con el fin de establecer la precipitación acumulada en los días previos al evento.

Esta metodología se basa, inicialmente, en la construcción de un modelo de probabilidad de ocurrencia para los deslizamientos acontecidos en Colombia; para esto se utiliza un modelo de regresión logística, el cual permite obtener una combinación lineal de las variables que están asociadas al evento mediante la siguiente expresión:

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p)}}$$

Según lo expresado por Mayorga (2003), la anterior ecuación se transforma en:

$$P(\text{deslizamiento} / X_1, X_2) = \frac{1}{1 + e^{-Z}}$$

$$Z = -19,2837 + 0,1546D + 0,0336LL_RV_D + 16,0931R_LL_D + 0,00152ALT$$

Donde:

D = Duración en días.

LL_EV_D = Lluvia del evento diaria.

R_LL_D = Relación entre la lluvia acumulada diaria y la lluvia anual.

ALT = Altitud.

Ahora, para analizar la lluvia del evento y su efecto inmediato sobre el deslizamiento, se utiliza la ecuación definida por Mayorga (2003), quien regionalizó el territorio colombiano en cuatro grupos; para esto, se usa la siguiente expresión:

$$LL_EV = A * LL_AC + B$$

Donde:

LL_EV = Lluvia del evento.

LL_AC = Lluvia acumulada.

A y B = Parámetros según clasificación.

Tabla 1

Parámetros según regionalización (Mayorga, 2003)

GRUPO	A	B
Grupo 1	-1,5824	421,5517
Grupo 2	-0,7479	470,2936
Grupo 3	-0,5172	509,0898
Grupo 4	-0,3550	525,6627

Análisis de la susceptibilidad

La susceptibilidad hace referencia a aquellas áreas que son más propicias a la ocurrencia de un peligro específico (Rauld et al., 2015). En el caso del análisis por flujo de detritos, esta es una medida que se puede evaluar en forma cualitativa o cuantitativa, estimando la magnitud y distribución espacial de los movimientos en masa existentes o que potencialmente pueden generarse en una zona determinada.

El método seleccionado para determinar la susceptibilidad es el método estadístico por pesos de evidencia,

el cual requiere el inventario de deslizamientos y una serie de mapas con los factores condicionantes por evaluar para establecer así relaciones funcionales entre factores de inestabilidad y la distribución pasada y presente de los movimientos en masa (SGC, 2017).

Para la generación de los mapas de los factores condicionantes por evaluar, lo primero que se debe hacer es seleccionar y verificar la información de base, ya que esta información se debe digitalizar y homogeneizar en cuanto a escala y convenciones, para así procesarlos mediante la herramienta de información geográfica Qgis. Posteriormente, cada uno de los mapas se subdivide en clases, de acuerdo con los valores de cada parámetro.

Definición de pesos

Los pesos asignados a cada clase del factor evaluado pueden ser positivos (W^+) o negativos (W^-). Los pesos positivos (W^+) indican la presencia de la clase como parámetro que favorece los movimientos en masa y su magnitud denota su correlación. El peso negativo (W^-) indica la ausencia de la clase. En caso de ser cero, significa que la clase analizada no es de interés para el fenómeno por movimiento en masa (Aristizábal et al., 2019).

$$W^+ = \ln \frac{\frac{N_{pix1}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix3} + N_{pix4}}{N_{pix3} + N_{pix4}}} \quad W^- = \ln \frac{\frac{N_{pix2}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix3} + N_{pix4}}{N_{pix3} + N_{pix4}}}$$

Para cada parámetro, se estima el peso de contraste o peso final (W_f), el cual da una medida de correlación entre el factor condicionante y los movimientos en masa.

$$W_f = W^+ - W^-$$

Índice de susceptibilidad

Este índice es la función final de la susceptibilidad. Corresponde a la sumatoria de la ponderación de los pesos finales calculados para la clase a la que pertenece cada píxel de cada uno de los factores evaluados.

$$LSI = W_f \text{Pendiente} + W_f \text{Curvatura} + W_f \text{UGS} + \dots + W_f \text{Uso del suelo}$$

Análisis de la amenaza por flujo de detritos

Para la generación de mapas de amenaza se implementa el modelo DebrisDice, que permite estimar la propagación de la susceptibilidad clasificada como alta, estableciendo el grado de amenaza en términos de áreas inundadas y valores de velocidad del flujo.

El modelo consiste en un algoritmo de enrutamiento del flujo de las celdas de susceptibilidad definidas, que simula una gran serie de caminos aleatorios (Montecarlo) a través de las rutas identificadas por el algoritmo D8 (GIIS-UPC, 2012), para luego generar las trayectorias finales del flujo mediante su probabilidad. Generalmente, el camino más empinado es el que tiene la mayor probabilidad (Bregoli et al., 2018).

La probabilidad para cada celda se calcula usando la siguiente ecuación:

$$P_{xy} = \frac{n_{afect}}{n_{iter}}$$

Donde:

n_{afect} = Número de trayectorias de flujo de detritos que invadieron una celda.

n_{iter} = Número de iteraciones.

Una vez definida la trayectoria del flujo, se debe establecer hasta qué punto se propaga; para esto se utiliza el mecanismo de parada mediante la relación entre el ángulo de alcance y el volumen total del flujo (Corominas, 1996):

$$\tan \beta = \frac{H}{L_{m\acute{a}x}} = 0,97V^{-0,105}$$

Donde:

β = Ángulo de alcance.

H = Gradiente entre el centro de masa del deslizamiento y el abanico (m).

$L_{m\acute{a}x}$ = Distancia recorrida (m).

V = Volumen de la cantidad total de sedimentos movilizados (m^3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inventario de deslizamientos

De la información obtenida se seleccionaron los años que representaban una mejor calidad de la información,

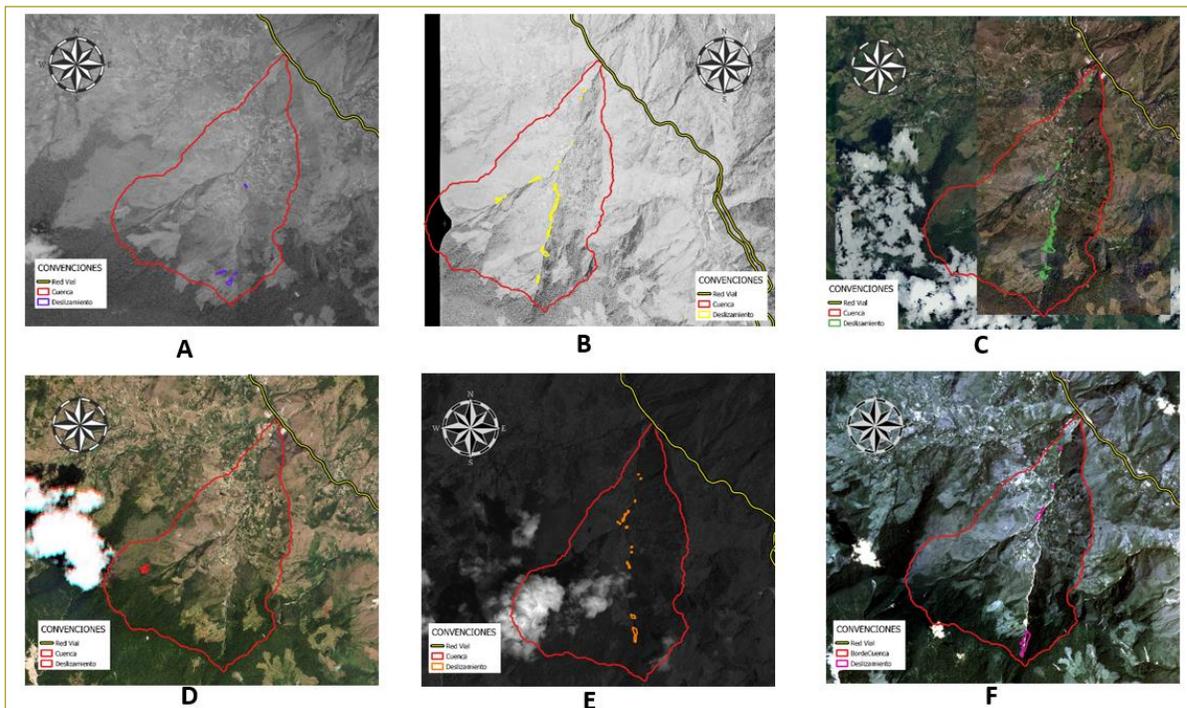


Figura 1. Análisis de imágenes satelitales y fotografías aéreas de la quebrada Estaquecá. A) Año 1985. B) Año 1997. C) Año 2009. D) Año 2010. E) 2011. F) Año 2019.

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi y PlanetScope modificado.

procurando incluir las fotografías e imágenes satelitales de los años previos y posteriores a los eventos ocurridos. Para cada año se delimitaron los deslizamientos mediante polígonos, para así identificar las áreas que resultaron afectadas por movimientos en masa dentro de la cuenca (figura 1).

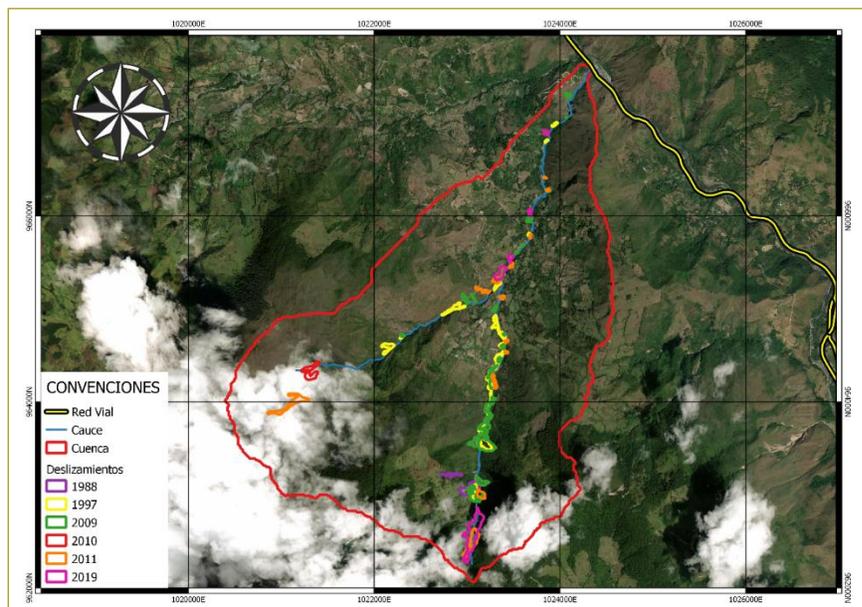
En la figura siguiente (figura 2) se presenta el resultado final del inventario, en el que se identificó que los procesos de inestabilidad se están generando principalmente en las laderas de los cauces, puesto que no se registraron deslizamientos en otras áreas de la cuenca.

Se puede evidenciar que las inestabilidades dentro de la cuenca están

relacionadas con la geología del sector y con procesos de socavación del lecho del cauce, pues se intuye que el arrastre de material dentro del cauce genera la pérdida del pie de los taludes, provocando de esta manera la inestabilidad de las laderas y su remoción en masa.

Figura 2 Inventario de deslizamientos en la quebrada Estaquecá.

Fuente: Google Hybrid modificado.



Estimación de la lluvia detonante

Para hacer este análisis se utilizó la información de precipitación diaria de la estación Monterredondo, que permitió obtener los registros de los años 1997, 2003, 2004, 2010 y 2019, que son los años donde se reportaron eventos de flujo de detritos. Con el fin de establecer la lluvia antecedente, se realizó la sumatoria de la precipitación en forma regresiva hasta obtener periodo seco; además, con la acumulación de esta lluvia y el número de días se construyó un gráfico para cada evento, donde las abscisas corresponden al número de días y las ordenadas a la precipitación acumulada (en mm) (figura 3).

A partir de la definición de la lluvia antecedente o acumulada, junto con la duración de días, se implementó el modelo de regresión logística para establecer la probabilidad de que haya un deslizamiento; este procedimiento se realizó para cada evento de flujo de detritos analizado. Los resultados obtenidos para cada evento se agruparon por rangos de precipitación acumulada, y con el fin de establecer los umbrales de precipitación acumulada como detonante, se procede a categorizar en cuatro clases (baja, media, media alta y alta) los rangos de precipitación acumulada de acuerdo con su probabilidad (tabla 2).

En cuanto la lluvia del evento, para el caso de la quebrada Estaquecá, esta se localiza en el grupo 3, definido por Mayorga (2003). Los resultados obtenidos de umbrales de lluvia evento y precipitación acumulada se presentan más adelante (tabla 3).

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que con una lluvia antecedente superior a 800 mm y un evento con una precipitación superior a los 41 mm se tiene una probabilidad alta para el desarrollo de evento por flujo de detritos.

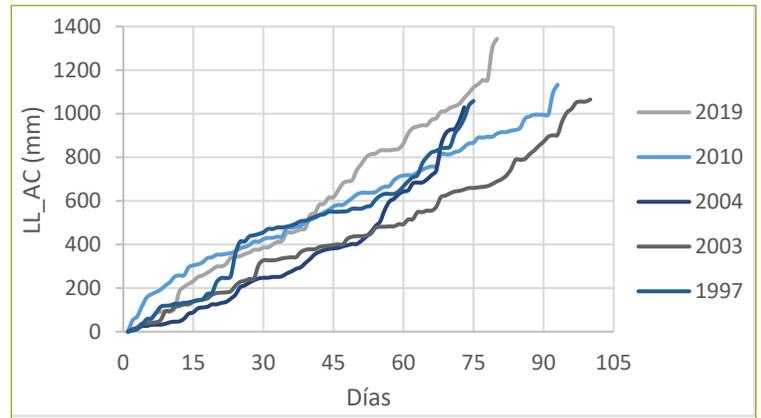


Figura 3. Gráfico de lluvia antecedente para los eventos de flujo de detritos reportados.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3

Definición de umbrales de lluvia del evento y precipitación acumulada

Año	LL_EV(mm)	LL_AC (mm)
1997	59	870,243
2003	10	964,984
2004	60	868,309
2010	39	908,912
2019	41	905,046
Promedio	41,8	903,499

Análisis de susceptibilidad

Para la estimación de la susceptibilidad se utilizaron los mapas de los factores condicionantes de las subunidades geomorfológicas, pendientes, longitud de la pendiente, convexidades y concavidades, litología, geología estructural y uso del suelo (figura 4).

Tabla 2

Probabilidad de ocurrencia de flujo de detritos por rangos de precipitación acumulada

Rango (mm)	Probabilidad						Clase
	1997	2003	2004	2010	2019	Promedio	
600	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,01	Baja
600-700	0,05	0,46	0,09	0,02	0,00	0,12	Media
700-800	0,32	0,70	0,17	0,10	0,04	0,27	
800-900	0,29	0,94	0,92	0,48	0,15	0,56	Media alta
900-1000	0,68	0,95	0,78	0,89	0,22	0,70	Alta
1000	0,94	0,95	0,93	1,00	0,90	0,94	

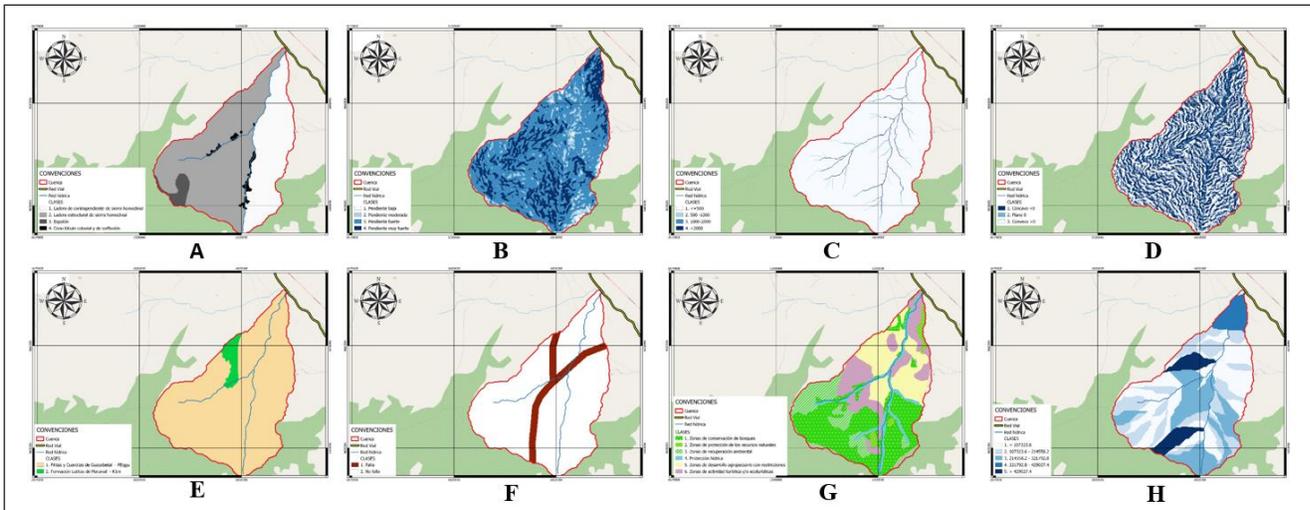


Figura 4. Factores condicionantes de la quebrada Estaquecá. A) Subunidades geomorfológicas. B) Pendientes. C) Longitud de lapendiente. D) Curvatura. E) Litología. F) Geología estructural. G) Uso de suelo. H) Áreas de drenaje lateral.

Fuente: Ingeominas, 2011a; EOT Quetame, 1999. Modificado.

Para la obtención del mapa de susceptibilidad se procede a asignar los pesos finales conseguidos en cada clase, para posteriormente sumar estos pesos de evidencias de la función de susceptibilidad establecida (LSI) mediante la herramienta calculadora ráster del *software* del sistema de información geográfica, Qgis (figura 5).

Análisis de la amenaza por flujo de detritos

Luego de establecer las zonas de susceptibilidad alta a deslizamientos en la cuenca, se procede a modelar

cómo estas áreas se propagan sobre el cauce, para lo cual se hace uso del modelo DebrisDice, que genera las trayectorias finales del flujo mediante su probabilidad. Después de definida la trayectoria del flujo, para establecer hasta qué punto se propaga, se utilizó el mecanismo de parada del flujo por medio de la relación entre el ángulo de alcance y el volumen de sedimentos.

De acuerdo con información suministrada por la concesión de la vía, el volumen de sedimentos que se ha retirado en la zona del puente es de un volumen aproximado de 50.000 m³, por lo que se obtiene así que el ángulo de alcance es:

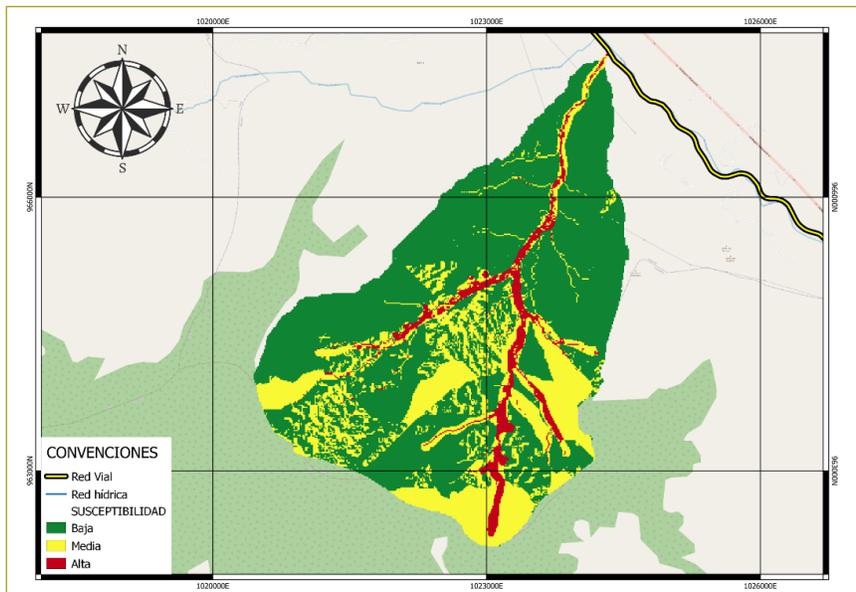
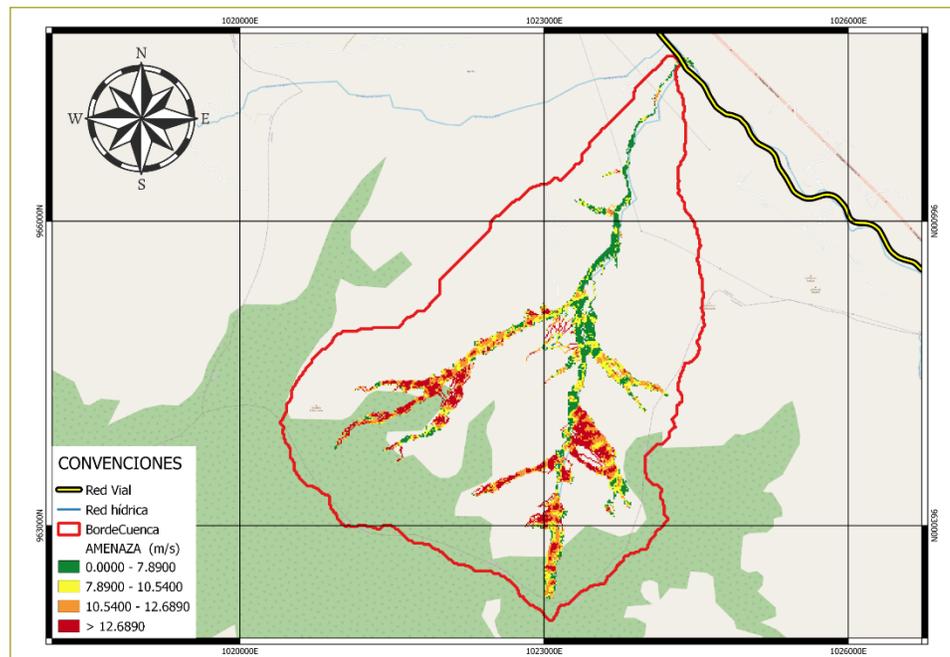


Figura 5. Mapa de la susceptibilidad en la cuenca de la quebrada Estaquecá.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Mapa de amenaza de flujo de detritos en la cuenca de la quebrada Estaquecá.
Fuente: Elaboración propia.



$$\beta = \tan^{-1} 0,97(50.000)^{-0,105}$$

$$\beta = 0,302$$

A continuación, se presentan los resultados de amenaza por flujo de detritos evaluada para la propagación de la susceptibilidad clasificada como alta. De igual manera, se hace una clasificación de la amenaza de acuerdo con los valores obtenidos de velocidad, estableciendo esta por medio de cuantiles (figura 6).

CONCLUSIONES

Del análisis de las imágenes con sensores remotos se identificó que los procesos de inestabilidad se están generando principalmente en las laderas de los cauces, ya que no se evidenciaron deslizamientos en otras áreas de la cuenca. En cuanto a la intervención antrópica, se considera que es un factor contribuyente en el desarrollo de las inestabilidades, pues se ve una mayor concentración de deslizamientos en la zona de cultivos de la quebrada Cajitas; sin embargo, no se considera que esta sea la causa principal de los deslizamientos.

De lo anteriormente expuesto, se puede concluir que las inestabilidades dentro de la cuenca están relacionadas con la geología del sector y con la evolución dinámica del cauce, como los procesos de socavación del lecho del cauce, pues se intuye que el arrastre de material

genera la pérdida del pie de los taludes, provocando así la inestabilidad de las laderas y su remoción en masa.

Adicionalmente, la quebrada se localiza en una zona geológica donde su material es inestable, constituido por filitas que presentan una foliación bien desarrollada, altamente diaclasada, fracturada y fallada, lo que produce caída de grandes bloques, puesto que se trata de rocas metamórficas que se presentan en una topografía abrupta de altas pendientes.

En cuanto a la lluvia detonante, se estima que con una lluvia antecedente superior al 800 mm y un evento con una precipitación superior a los 41 mm se tiene una probabilidad alta para el desarrollo de eventos por flujo de detritos.

Del mapa de susceptibilidad cabe destacar que la susceptibilidad clasificada como alta se localiza sobre los cauces de la cuenca, siendo coincidente con el inventario de deslizamientos; la susceptibilidad media, a su vez, se desarrolla principalmente en la parte alta de la cuenca, en tanto que la susceptibilidad baja lo hace en la parte baja de la cuenca.

Por último, en el mapa de amenaza se encontró que las mayores velocidades se desarrollan en la parte alta de la cuenca, en las quebradas Las Lajas y Las Cajitas, que es donde se tienen las mayores pendientes y donde se presentan los mayores volúmenes de propagación; en esta zona se reportan velocidades superiores a los 12,69

m/s; por el contrario, en la parte baja de la cuenca se presentan las menores velocidades. No obstante, estas aún son altas, con valores de hasta 7,89 m/s.

REFERENCIAS

- Aristizábal, E., Vásquez, M., & Ruiz, D. (2019). Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa. *TecnoLógicas*, 22(46), 39–60.
- Bregoli, F., Medina, V., & Bateman, A. (2018). TXT-tool 3.034-2.1 a debris flow regional fast hazard assessment toolbox. In *Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools* (vol. 2, pp. 225–234). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57777-7_10.
- Cormacarena (2018). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Guayuriba*.
- Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(2), 260–271.
- Coussot, P., & Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40(3–4), 209–227. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(95\)00065-8](https://doi.org/10.1016/0012-8252(95)00065-8)
- Dietrich, W. E., & Montgomery, D. R. (1998). *Shalstab. Esquema de ordenamiento territorial. Municipio de Quetame* (1999).
- GITS-UPC (2012). DebrisDice. Universidad Politécnica de Cataluña. Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (2011a). *Plancha 217. Cáqueza. Escala 1:100.000*.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2011b). *Cartografía geológica de la plancha 217 Cáqueza. Memoria explicativa. Escala 1:100.000*.
- Legorreta Paulín, G., Bursik, M., Solene, P., Lugo Hubp, J., Paredes Mejía, L. M., & Aceves Quesada, F. (2014). Inventario multitemporal, análisis de susceptibilidad y estimación de volumen de deslizamientos en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 343–354.
- Mayorga, R. (2003). Determinación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 7(ISSN-0124-6984), 157–168.
- O'Brien, J. S., Julien, P. Y., & Fullerton, W. T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119, 244–261.
- Páez Pedraza, J. P. (2016). *Modelación matemática de flujos de avalancha* (trabajo de gradomaestría, Universidad de los Andes, Bogotá).
- Pierson, T. C., & Costa, J. E. (1987). A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, VII, 1–12.
- Rauld, R., Fock, A., García, F., Letelier, V., Bandilla, P., Gallardo, J., Luca, R., Muñoz, L., & Cancino, O. (2015, October). Estudio de peligro, susceptibilidad, vulnerabilidad y medidas de mitigación en la ruta de alta montaña 115-Ch. Paso Internacional Pehuenche, Región del Maule (~36 °S). XIV Congreso Geológico Chileno. Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000*.
- Soeters, R., & Van Westen, C. (1996). Slope instability recognition, analysis, and zonation. In A. K. Turner & R. L. Schuster (eds.), *Landslides, investigation and mitigation (Transportation Research Board, National Research Council, Special Report; 247)* (pp. 129–177). National Academy Press.
- Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales* (Ingeniería de Suelos Ltda., Ed.). Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Takahashi, T. (2007). *Debris Flow. Mechanics, Prediction and Countermeasure*. Taylor & Francis e-Library.

Evaluación de metodologías de interacción suelo-estructura aplicadas a la acción simultánea de estructuras adyacentes para cimiento superficial

Methodology assessment for soil-structure interaction applied to the simultaneous action of adjacent structures for shallow foundations

LILIANA CAMACHO ANGARITA¹ - JAIME ERASMO GARZÓN MORENO²

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Ingeniero civil. Especialista en Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

liliana.camacho-a@mail.escuelaing.edu.co - jaime.garzon@escuelaing.edu.co

Recibido: 13/09/2021 Aceptado: 16/10/2021

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

Para cimientos superficiales, el análisis y el diseño han estado tradicionalmente ligados al uso de metodologías simplificadas, que aceptan la hipótesis de la variación de esfuerzos en el suelo, como comportamiento lineal elástico, asumiendo el cimiento como “rígido”, lo que idealiza ambos medios; por ello, es necesario considerar la interacción suelo-estructura.

En este artículo se evalúan las metodologías bajo el modelo de Winkler y la modelación mediante elementos finitos, considerando el problema de la acción de estructuras adyacentes cargadas simultáneamente para placa de cimentación, considerando tres sistemas estructurales (pórticos en concreto, muros de carga y mampostería estructural, para un edificio de cinco pisos), de lo cual se evidenció que en edificaciones colindantes, cargadas de manera simultánea en el suelo, el comportamiento de las placas se verá reflejado como si fuera una sola cimentación, y si una estructura es cargada inicialmente y posteriormente la otra, esta última refleja incrementos en los resultados de la primera cimentación.

Se comprueba que para el modelo de Winkler, para la condición de estructuras simultáneas, los resultados son conservadores; para el caso en el que se carga de manera posterior, la metodología de Winkler no refleja el incremento de los esfuerzos y deformaciones de la edificación cargada inicialmente, siendo la modelación por elementos finitos la más acertada.

Palabras claves: interacción suelo-estructura, cimentaciones superficiales, esfuerzos, deformaciones, colindancia, estructuras adyacentes.

Abstract

For shallow foundations, the analysis and design has traditionally been linked to the use of simplified methodologies, which accepts the hypothesis of stress variation in the soil, as linear elastic behavior, assuming the foundation as “rigid”, which idealizes both media. Therefore, it is necessary to consider the soil-structure interaction.

In this paper, the methodologies are evaluated under the Winkler model and finite element modeling, considering the problem of the action of adjacent structures loaded simultaneously for foundation plate, considering three structural systems (concrete frames, load-bearing walls, and structural masonry, for a 5-storey building). It was evidenced that in adjacent buildings loaded simultaneously on the ground, the behavior of the plates will be reflected as if it were a single foundation, and if one structure is loaded initially and then the other, the latter reflects increases in the results of the first foundation.

It is verified that for the Winkler model, for the condition of simultaneous structures, the results are conservative, while for the case of subsequent loading, the Winkler methodology does not reflect the increase in the stresses and deformations of the initially loaded building, being the finite element modeling the most accurate one.

Keywords: soil-structure interaction, shallow foundations, stresses, deformations, adjoining structures, adjacent structures.

INTRODUCCIÓN

Toda obra de ingeniería debe garantizar, tanto en el diseño como en su construcción, criterios de seguridad, estabilidad y funcionalidad que permitan preservar las vidas que en ellas se consideran y se mantengan a lo largo de su vida útil.

Las cimentaciones son las encargadas de transmitir el conjunto de fuerzas generados por las cargas y pesos a una zona capaz de soportarlas, la cual, como respuesta a dicha perturbación a su condición inicial, se deforma y presenta cambios de esfuerzos que afectan la estabilidad y el funcionamiento; lo anterior describe en general el comportamiento que pueden presentar el suelo o roca en que se apoyan las estructuras.

Caso común de las zonas urbanas es construir las estructuras adyacentes a otras, y siendo independientes cada una de las edificaciones, las cargas transmitidas al suelo o roca pueden generar superposición de bulbos de presiones, que, a su vez, pueden producir asentamientos excesivos o incluso la falla del suelo, por estar este sometido a esfuerzos superiores a su resistencia permisible.

Por esto, en el presente artículo se estudian los esfuerzos y deformaciones del suelo y la estructura, para el caso de edificaciones adyacentes para tres sistemas estructurales (pórticos en concreto, muros de concreto y muros en mampostería), empleando las metodologías de interacción suelo-estructura.

Es importante abordar esta propuesta, ya que es menester para la ingeniería de fundaciones estudiar los comportamientos e incidencias de la estructura-suelo, además de que se puede tomar referencia de casos comunes a los cuales los ingenieros de hoy se ven enfrentados. Dicho enfoque compete no solo a los ingenieros estructurales, quienes son los diseñadores de la estructura del cimiento, sino también a la rama de la geotecnia, pues en la interacción de estos dos énfasis de la ingeniería, principalmente en el estudio de los suelos de fundación, se producen mayor incertidumbre y varios factores que influyen en su comportamiento.

METODOLOGÍA

El proyecto arquitectónico consiste en un par de edificaciones de cinco pisos, localizado en la ciudad de Bogotá, destinado para uso residencial; tiene sistemas estructurales para cada par, según el análisis: pórticos en concreto, muros de carga y mampostería estructural.

La estructura tipificada consta de cinco pisos, con una altura total de 15 m; cada piso corresponde a 3 m, con una sección de 14,14 m por 16,64 m, para un total de 235,3 m², aproximadamente, como se muestra a continuación (figuras 1 y 2):

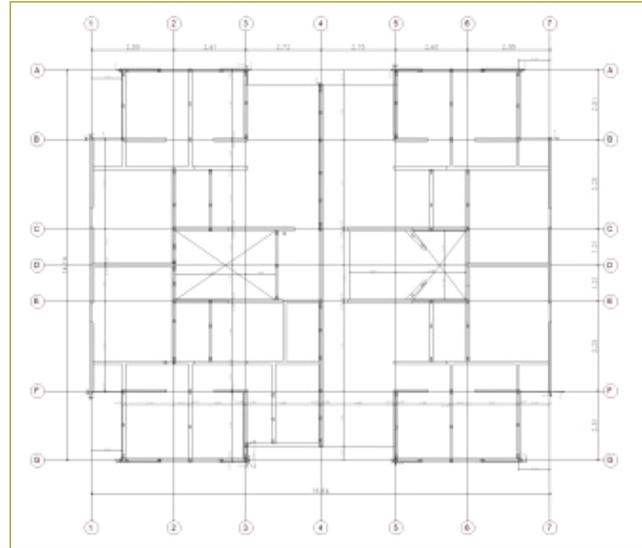


Figura 1. Planta arquitectónica de una edificación tipificada (fuente propia).

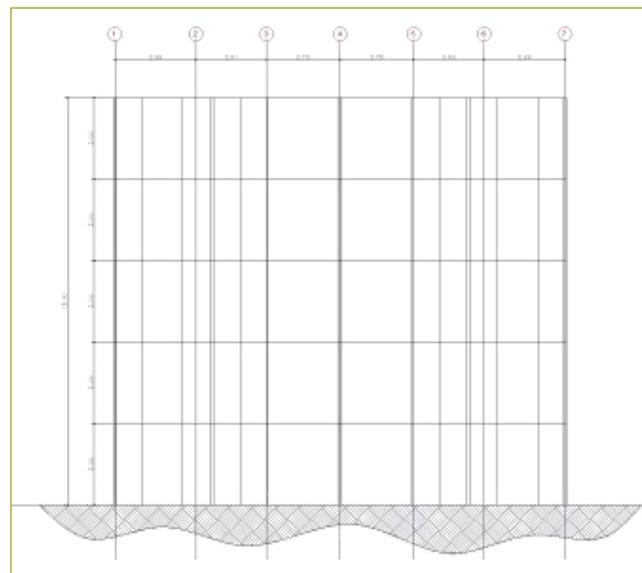


Figura 2. Esquema de fachada arquitectónica de una edificación tipificada (fuente propia).

Se definieron el sistema estructural previo predimensionamiento, el sistema de entepiso y la cubierta que se va a emplear, se procedió a hacer el respectivo análisis de cargas gravitacionales (cargas muertas, cargas

vivas, etc.). Según clasificación del título B de NSR-10. Seguidamente, se realizó la modelación del edificio en un programa de análisis estructural de uso comercial (en la elaboración del presente proyecto, se emplearon SAP2000 V23.1.0 V23.1.0 y ETABS V19.0.0 V19.0.0 en el proceso de modelación estructural de las edificaciones y de la cimentación) y se aplicaron las cargas calculadas previamente.

Se realizó análisis sísmico únicamente de la edificación, puesto que el análisis de la cimentación será estático y no dinámico; dicho análisis modal espectral se hizo de acuerdo con el capítulo A.5 de NSR-10. El movimiento sísmico de diseño, correspondiente al espectro elástico de aceleraciones, se obtuvo con base en los parámetros sísmicos de los edificios, obtenidos de acuerdo con la clasificación de la estructura en la zona de amenaza sísmica intermedia (correspondiente a la zona de localización del análisis), el cual se establece en los mapas de aceleraciones pico espectrales del terreno en el título A de NSR-10 y la clasificación del suelo, según datos geotécnicos típicos de la ciudad; una vez calculadas las cargas gravitacionales y laterales actuantes en las estructuras, se procedió a aplicar dichas fuerzas sobre el modelo matemático del edificio, y posteriormente se ejecutó el análisis estructural con base en los requisitos contemplados en la NSR-10.

Por medio del análisis estructural, se obtuvo la fuerza sísmica cortante en la base del edificio, calculada con el análisis modal espectral, comparada y ajustada con el método de la fuerza horizontal equivalente, lo que da como resultado los valores de fuerzas internas en los elementos (vigas y columnas) y los desplazamientos laterales de la estructura, generados por el desplazamiento en la base de la edificación. Posteriormente, se revisaron los desplazamientos máximos, los cuales se encontraron por debajo de los valores máximos permitidos por el capítulo A.6. Derivas, de NSR-10, y también se revisó que los elementos que conforman el sistema de resistencia sísmica, como las columnas y las vigas de concreto reforzado, cumplan con los requisitos de resistencia y deformaciones permitidos.

Todo esto se hizo para cada par de edificios en cada uno de sus sistemas, con el fin de determinar la separación de las estructuras que se plantearon adyacentes; para los tres casos se tomó la distancia más desfavorable, que corresponde al análisis del sistema de pórticos, el cual es la estructura menos rígida.

Con el modelo de la superestructura resuelto y obtenidas las cargas transmitidas por los edificios al suelo de cimentación, para el cual se tomaron previamente los datos de un estudio geotécnico, hecho en la carrera 13 # 10-83/85/91, sector de San Victorino, en Bogotá, se extrajeron muestras alteradas y se hicieron los ensayos físicos y mecánicos, tales como límites de Attenberg, humedades, compresiones inconfiadas, y se encontraron los siguientes estratos: baldosa y placa en concreto, hasta profundidades de 0,15, 0,14, 0,10 y 0,12 m; relleno en limo arcilloso mezclado con escombros, hasta profundidades de 0,40, 0,50, 0,55 y 0,60 m; MH, limo arcilloso orgánico color gris, con vetas café de alta compresibilidad, hasta profundidades de 1,40, 1,60, 1,80 y 1,70 m; MH, arcilla arenosa en matriz gravosa color habano grisácea, con vetas amarillas de oxidación de humedad y plasticidad media alta, consistencia media a blanda, hasta profundidades de 5,00, 5,20, 5,30 y 5,28 m; arcilla color gris de humedad y plasticidad media alta, de consistencia media a blanda, hasta profundidades de 15,10, 15,20, 15,12 y 15,60 m; CH; el nivel freático se ubica entre 2,20 m y 2,62 m. Los demás datos se encuentran contemplados en el estudio en mención y los estudios complementarios tomados de Bogotá (2016).

Con los datos del estudio de suelo y las cargas resultantes del análisis estructural, se planteó como sistema de cimentación para cada sistema la cimentación superficial por medio de losas; lo anterior, de acuerdo con el análisis realizado para cada caso, así: pórticos en concreto, muros de carga y muros en mampostería estructural.

Las cimentaciones y el suelo de los dos pares de edificios colindantes se modelaron y analizaron en los programas SAP2000 V23.1.0 y ETABS V19.0.0 (de uso común estructural), y en el programa Midas GTS NX V20 2.1 (de uso geotécnico), con el fin de incluir el comportamiento no elástico del suelo.

El primer análisis matemático se hizo con la metodología de fundación elástica simplificada, que se conoce comúnmente como el método de Winkler. En esta, el suelo sobre el que se apoya el cimiento se idealiza como una cama de resortes independientes (que representan el terreno), colocados bajo la cimentación en cuestión, con la expresión $k_s = \text{esfuerzo aplicado} / \text{deformación esperada}$. Todo esto, para los tres casos de estructuras tipificadas, siendo tres modelos matemáticos.

El segundo análisis matemático se llevó a cabo por la metodología de los elementos finitos, modelando un volumen importante del terreno con el empleo del programa Midas GTS NX V20 2.1. El modelo constitutivo es el modelo para suelo blando (Soft Soil), el cual es apropiado para arcillas, arcillas limosas y turbas, normalmente consolidadas o ligeramente sobreconsolidadas, con un alto grado de compresibilidad; las principales características del modelo constitutivo son:

- Las trayectorias de esfuerzo dependen de la rigidez del suelo.
- Se hace la distinción entre la etapa de carga primaria y la etapa de carga y descarga.
- Se tiene en cuenta la historia de preconsolidación del suelo.
- Se usa el criterio de falla del modelo Mohr-Coulomb modificado.

Esto se aplica para los tres casos de estructuras tipificadas, empleando así dos modelos matemáticos por interacción suelo-estructura.

Para definir el volumen de terreno que hay que modelar, se evaluó, con el planteamiento propuesto por Boussinesq, en el que los esfuerzos en el interior de una masa semiinfinita, producidos por una carga que actúa en su superficie se distribuyen en el suelo de forma vertical y horizontal, generando bulbos de esfuerzos para la carga en cuestión. Para ambos casos, se tomarán hasta la profundidad de influencia de la cimentación que se da a cinco veces el ancho de la cimentación 5B. (Bowles, 1996).

Para los seis modelos matemáticos, se analizó el comportamiento del terreno y del cimiento a través de los desplazamientos resultantes, presiones actuantes, esfuerzos en los elementos, valores de fuerzas cortantes, momentos de flexión, cargas axiales y demás variables (figura 3). Esto con el fin de obtener resultados de los efectos de los esfuerzos y deformaciones de cada medio en la interacción entre el suelo-cimiento, donde se hizo una evaluación entre los resultados de las dos metodologías para las condiciones resultantes para cada sistema estructural del par de edificaciones colindantes.

RESULTADOS

Una vez analizados los modelos, se obtienen las cargas transmitidas al cimiento, de las cuales se plantean las soluciones de la cimentación superficial. Se considero que, de los sistemas estructurales realizados, el sistema de pórticos en concreto plantea la mayor alternativa de cimentación superficial (zapatas, vigas de cimentación, losas, etc.).

Teniendo en cuenta la carga vertical para cada punto en la base del sistema estructural de pórticos en concreto, la distribución para cimentación superficial, para el caso más favorable (zapata concéntrica sometida a carga axial únicamente), se ilustra más adelante (figura 4):

En razón de que la dimensión del edificio es de 13,15 m x 16,44m, con un área de 216,19 m², el área de cimiento necesaria (asumiendo cimentación superficial concéntrica, sometida a carga axial únicamente), es de 144,03 m², lo que equivale al 67 % del área total, que,

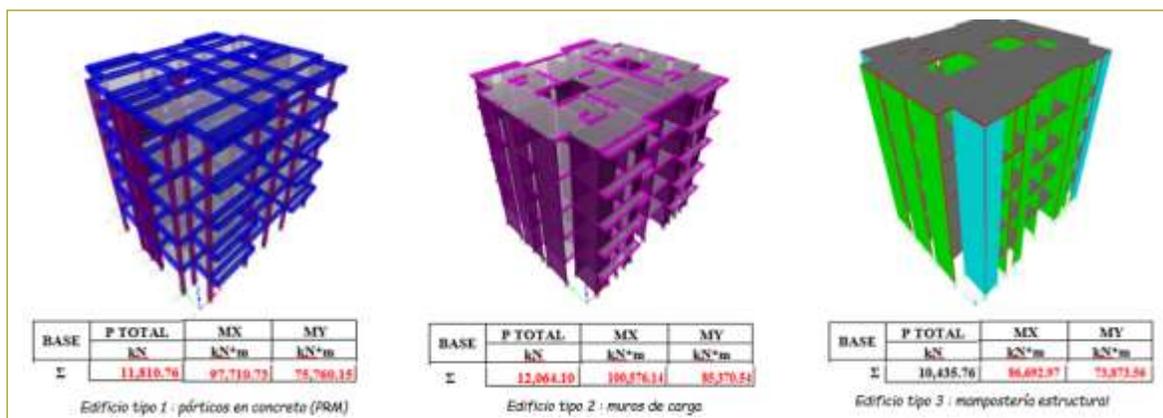


Figura 3. Resultados de las modelaciones de las edificaciones bajo los tres sistemas estructurales.

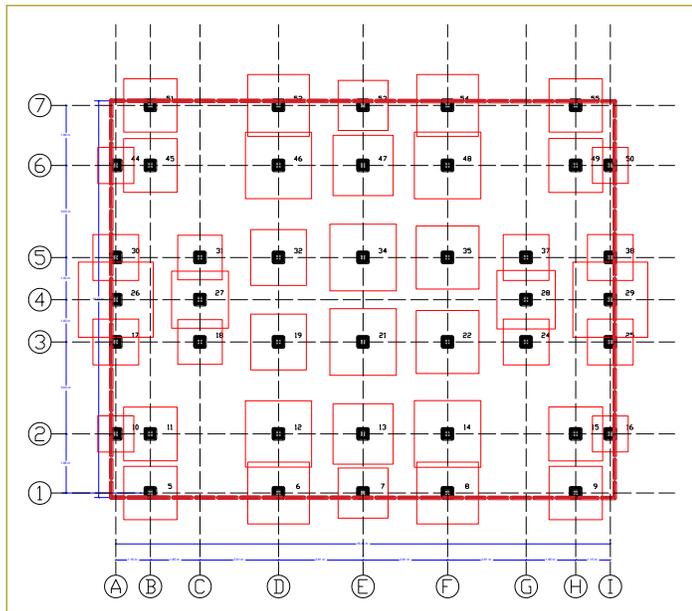


Figura 4. Representación de la distribución de cimiento superficial concéntrico bajo carga axial para edificio en sistema estructural de pórticos en concreto.

en algunos sectores, el cimiento se superpone a otro; además, las columnas de borde, dentro del área requerida, se salen del lindero.

Por lo anterior, y teniendo en cuenta que los sistemas estructurales en muros de carga y mampostería reforzada requieren cimientos corridos, para el caso analizado anteriormente, superando el 50 % del área en planta de la estructura, se necesita una losa de cimentación para el par de estructuras tipificadas en los tres sistemas estructurales (pórticos en concreto, muros de carga y mampostería reforzada).

Se determinaron las cargas y se ubicó con la alternativa de cimentación bajo placa de cimentación, el centro de masa y centro de cargas de los tres sistemas estructurales (tablas 1, 2 y 3).

Tabla 1

Centro de masa y centro de carga de la placa de cimentación para el sistema de pórticos en concreto

Punto	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Excentricidad
C. de masa	8,22	6,58	0,05 en X
C. de carga	8,27	6,41	0,16 en Y
C. relleno	6,37	12,17	15,40 m ³

Tabla 2

Centro de masa y centro de carga de la placa de cimentación para el sistema estructural de muros de carga

Punto	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Excentricidad
C. de masa	8,22	6,43	0,12 en X
C. de carga	8,34	7,08	-0,65 en Y
C. relleno	7,25	1,00	65,85 m ³

Tabla 3

Centro de masa y centro de carga de la placa de cimentación para el sistema estructural de muros de mampostería estructural

Punto	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Excentricidad
C. de masa	8,22	6,58	0,09 en X
C. de carga	8,31	7,08	-0,50 en Y
C. relleno	7,25	1,00	42,87 m ³

El espesor de la placa de cimentación se ha definido mediante un proceso iterativo, empleando la ecuación de Winkler, donde:

$$\beta = \frac{K_s}{\sqrt[4]{\frac{4E_c I}{B}}}$$

Para los tres casos de sistemas estructurales, la geometría de la cimentación se muestra a continuación (tabla 4).

Tabla 4

Datos de la geometría de la placa de cimentación

e (m)	0,07	Espesor loseta superior
t (m)	0,20	Espesor loseta inferior
e (m)	0,25	Ancho de las viguetas
h (m)	0,84	Altura de las viguetas
hl (m)	0,64	Alma viga
s (m)	1,00	Separación de viguetas
hl (m)	0,57	Altura libre

Definida la sección, se centraron las cargas, dadas las excentricidades para cada sistema estructural.

Así mismo, de acuerdo con la geometría de la estructura tipificada, y con lo referido anteriormente, la

separación de las estructuras adyacentes por sismo se muestra a renglón seguido (tabla 5).

Tabla 5
Separación sísmica mínima

Nivel	Altura entre piso (m)	Separación (m)
Piso 1	3,00	0,06
Piso 2	6,00	0,12
Piso 3	9,00	0,18
Piso 4	12,00	0,24
Piso 5	15,00	0,30
Separación sísmica mínima (m)		0,30

A partir de los resultados de la exploración manualmente en cuatro sondeos realizada en la carrera 13 # 10-83/85/91, sector de San Victorino, en Bogotá, en el año 2013 (Ingeolab, 2013) y datos complementarios cerca de la localización del estudio de suelos base (Bogotá, 2016), se determinaron los parámetros geotécnicos para las modelaciones (figura 5).

Modelación de la metodología de Winkler

Se obtiene el coeficiente de rigidez del suelo por la metodología de Winkler, donde:

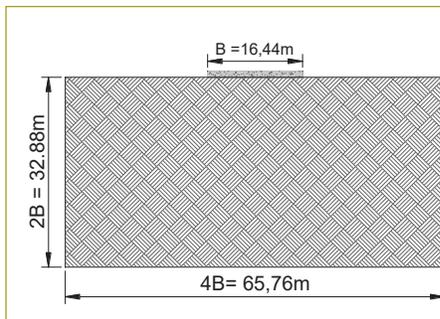
$$K_s = \frac{\sigma_{adm}}{\delta} = \frac{153,37 \text{ kN/m}^2}{0,054 \text{ m}} = 2840,19 \text{ kN/m}^3$$

ID	Inicial	Final	Media	Descripción	Ncampo (Golpes/pie)	W _s (%)	LL	LP	IP	Gravas	Arenas	Finos	S _u (kPa)	c' (kPa)	γ'	G _s	e ₀	C _c	C _r	OCR	k(m/s)	l	k
1	0.00	1.00	0.50	Relleno Antrópico	-	25	60	40	20	-	20	80	60	30	25.8	2.650	0.663	0.450	0.045	5.000		0.118	0.012
2	1.00	4.00	2.50	Arcilla algo arenosa de alta plasticidad	7	45	80	30	50	-	95	5	60	18	20.2	2.650	1.193	0.630	0.063	2.500	5.0.E-08	0.125	0.012
3	4.00	7.00	5.50	Limo gris con presencia de arena de grano fino	3	30	40	20	20	5	55	40	25	30	25.8	2.650	0.795	0.270	0.027	1.800	2.0.E-09	0.065	0.007
4	7.00	10.00	8.50	Limo gris con presencia de arena de grano fino	8	40	40	25	15	-	45	55	20	30	27.5	2.650	1.000	0.270	0.027	1.500	2.0.E-09	0.057	0.006
5	10.00	15.00	12.50	Arcilla arenosa con presencia de materia orgánica	10	60	70	25	45	-	5	95	45	21	20.9	2.650	1.590	0.540	0.054	1.900	2.0.E-09	0.091	0.009
6	15.00	17.00	16.00	Arena fina con algo de arcilla	13	17	NLL	NLP	NIP	-	80	20	-	-	31	2.650	0.451	-	-	-	1.0.E-04	-	-
7	17.00	25.00	21.00	Arena limosa con presencia de gravas subredondeadas	20	19	NLL	NLP	NIP	30	50	20	-	7	29	2.650	0.504	-	-	-	1.0.E-06	-	-

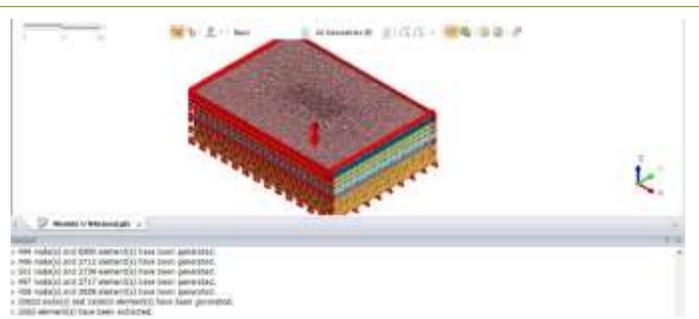
Figura 5. Parámetros geotécnicos del sector de San Victorino en Bogotá.

Modelación de la metodología de elementos finitos

Se lleva a cabo el modelo por elementos finitos de la sección de suelo dada por 5B, que, para este caso, se toma la sección de longitud más larga, que corresponde a 16,44 m, lo cual da una distancia de 32,88 m. A continuación, se presenta un esquema del volumen de suelo evaluado:



Esquema del volumen de suelo evaluado.



Modelo en 3D del volumen de suelo-modelación de elementos finitos.

A renglón seguido, se reflejan los resultados del modelo matemático de la cimentación para los tres sistemas estructurales considerados y bajo las metodologías consideradas:

Resultados de asentamientos

1 edificio- porticos en concreto (winkler)	1 edificio- muros de carga (winkler)	1 edificio- Mampostería estructural (winkler)
1 edificio- porticos en concreto (Elementos Finitos)	1 edificio- muros de carga (Elementos Finitos)	1 edificio- Mampostería estructural (Elementos Finitos)
2 edificio carga simultánea- porticos en concreto (Elementos Finitos)	2 edificio carga simultánea - muros de carga (Elementos Finitos)	2 edificio carga simultánea - Mampostería estructural (Elementos Finitos)
carga 1 edificio primero y luego el otro- porticos en concreto (Elementos Finitos)	carga 1 edificio primero y luego el otro - muros de carga (Elementos Finitos)	carga 1 edificio primero y luego el otro - Mampostería estructural (Elementos Finitos)

Tabla 6
Resultados comparativo asentamientos

Asentamientos totales (cm)			Asentamientos diferenciales (cm)			
Modelo de elementos finitos			Modelo método de Winkler			
	Un edificio	Edificios adyacentes	Edificios adyacentes		Mínimo	Máximo
Consideración de carga en el suelo	Un edificio	Simultánea	Construcción posterior 2 de edificio			
Pórtico en concreto (cm)	-7,92	-9,66	-12,28	Pórtico en concreto (cm)	-2,25	-3,36
Muros de carga (cm)	-8,02	-8,99	-11,79	Muros de carga (cm)	-2,40	-3,05
Muros en mampostería estructural (cm)	-7,04	-7,89	-10,00	Muros en mampostería estructural (cm)	-2,00	-2,90

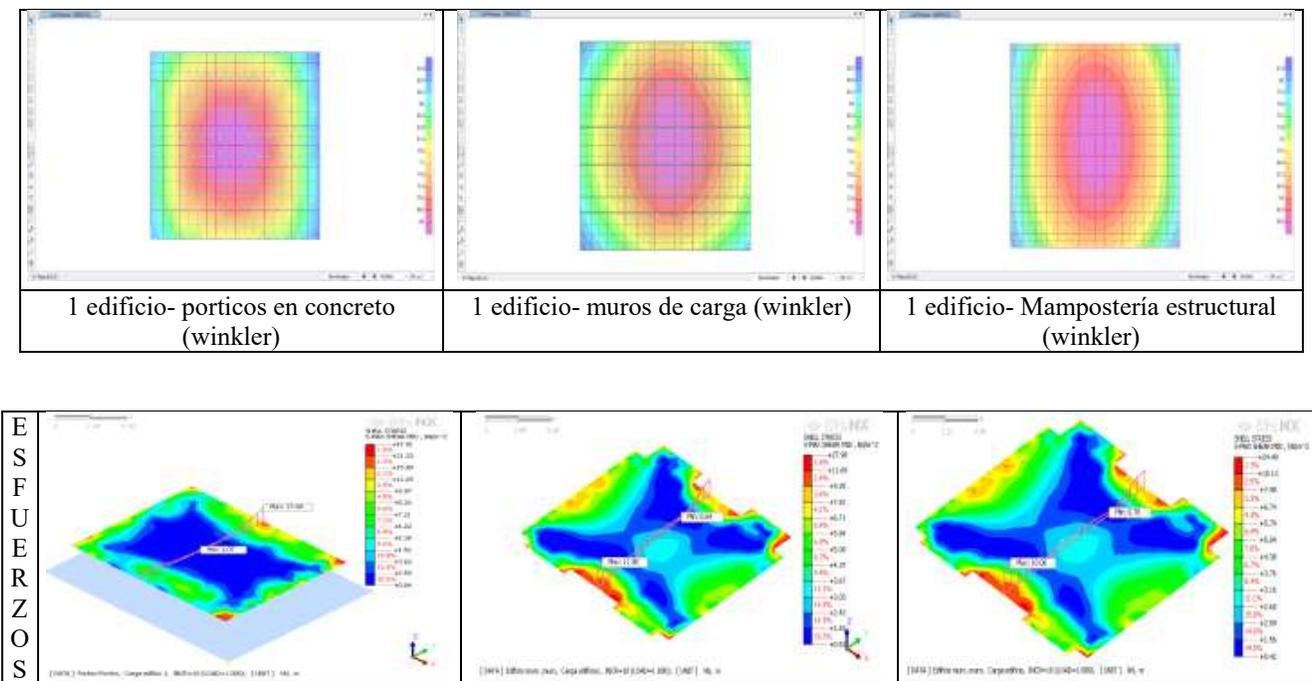
No se puede hacer una comparación entre las modelaciones de elementos finitos y tipo Winkler, ya que, mediante el análisis de elementos finitos, se obtienen asentamientos totales evaluados por cada edificación, y para el análisis de Winkler, se obtienen asentamientos diferenciales debido a que no considera la colindancia de estructuras.

En la tabla anterior (tabla 6), los resultados de modelo por elementos finitos indican que los mayores asentamientos ocurren para el sistema estructural de muros de carga tanto para un edificio como para los

edificios adyacentes, cargados de manera simultánea, y los menores asentamientos ocurren para el sistema de mampostería estructural. En todos los casos de sistemas estructurales, el caso de dos edificaciones adyacentes produce asentamientos mayores que el escenario con una sola edificación.

Para asentamientos diferenciales, el modelo de Winkler indica un asentamiento mayor para el edificio de sistema estructural de pórticos, seguido del edificio de muros de carga, en tanto que el menor asentamiento máximo es para muros de mampostería estructural.

Resultados de esfuerzos y deformaciones cortantes; esfuerzos actuantes



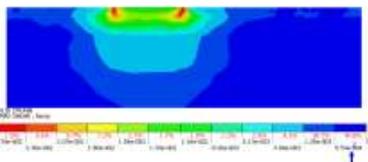
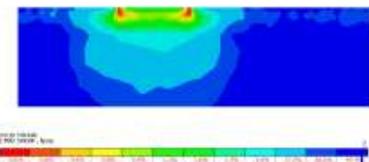
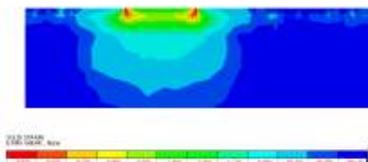
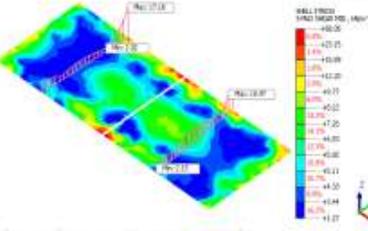
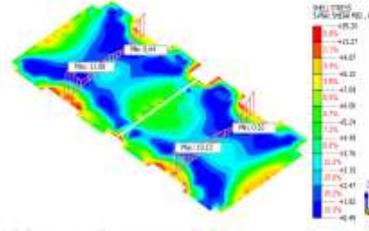
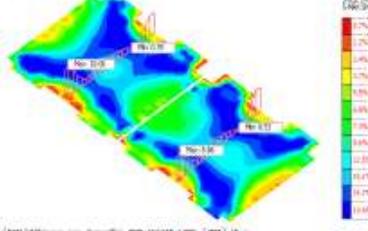
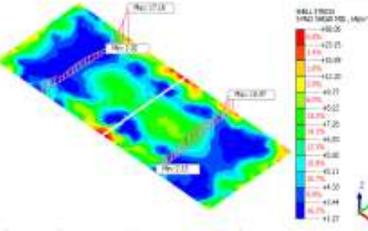
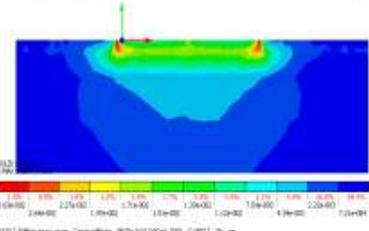
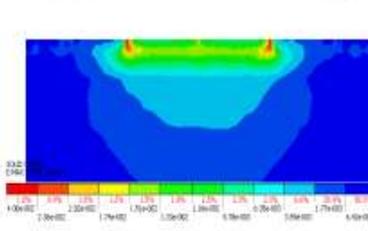
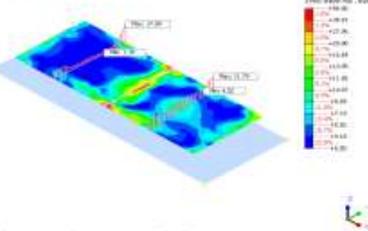
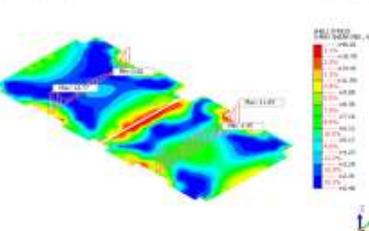
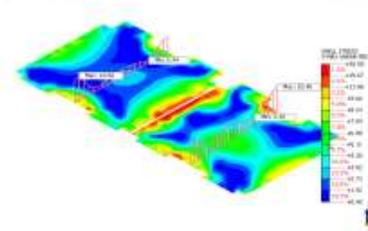
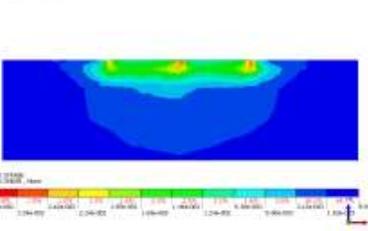
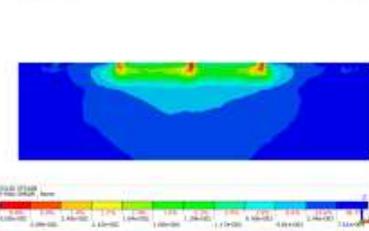
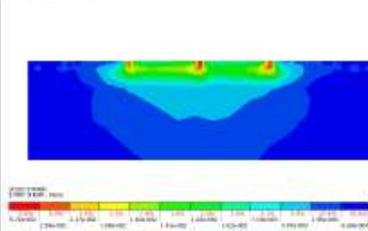
D E F E C T O			
	1 edificio- porticos en concreto (Elementos Finitos)	1 edificio- muros de carga (Elementos Finitos)	1 edificio- Mampostería estructural (Elementos Finitos)
E S F U E R Z O S			
D E F E C T O			
	2 edificio carga simultánea- porticos en concreto (Elementos Finitos)	2 edificio carga simultánea - muros de carga (Elementos Finitos)	2 edificio carga simultánea - Mampostería estructural (Elementos Finitos)
E S F U E R Z O S			
D E F E C T O			
	carga 1 edificio primero y luego el otro- porticos en concreto (Elementos Finitos)	carga 1 edificio primero y luego el otro - muros de carga (Elementos Finitos)	carga 1 edificio primero y luego el otro - Mampostería estructural (Elementos Finitos)

Tabla 7
Resultados de esfuerzo y deformación cortante por elementos finitos

Esfuerzo y deformación cortante										
Modelo de elementos finitos										
	Un edificio			ε_V máx	Edificios adyacentes			ε_V máx	Edificios adyacentes	
	σ -mín	σ -máx	(%)		σ -mín	σ -máx	(%)		σ -mín	σ -máx
					carga simultánea				carga 2 posterior	
Pórtico en concreto (kN/m ²)	0,84	47,01	2,78 %		1,27	58,05	3,99 %		0,55	96,80
Muros de carga (kN/m ²)	0,51	27,98	5,00 %		0,45	35,20	3,63 %		0,48	40,01
Muros en mampostería estructural (kN/m ²)	0,42	24,49	5,23 %		0,40	31,80	4,00 %		0,45	30,50

Como resultado de las modelaciones mediante elementos finitos mostrados en la tabla anterior (tabla 7), se determina que los muros en mampostería producen los menores valores de esfuerzo cortante, seguido de muros de carga y luego mampostería estructural. Sin embargo, las deformaciones volumétricas unitarias son menores en la estructura de pórticos y aumentan para los escenarios de muros de carga y mampostería estructural.

Para los resultados del modelo tipo Winkler, los esfuerzos actuantes mayores ocurren en la estructura de

pórticos, seguido de muros de carga, y el menor valor corresponde a muros de carga (tabla 8).

Tabla 8
Resultado de esfuerzos actuantes del modelo tipo Winkler

Esfuerzo		
Modelo del método de Winkler		
	σ -mín	σ -máx
Pórtico en concreto (kN/m ²)	66,00	94,60
Muros de carga (kN/m ²)	70,00	88,20
Muros en mampostería estructural (kN/m ²)	60,80	81,60

Resultados cortantes

1 edificio- porticos en concreto (winkler) XX	1 edificio- muros de carga (winkler) XX	1 edificio- Mampostería estructural (winkler) XX
1 edificio- porticos en concreto (winkler) YY	1 edificio- muros de carga (winkler) YY	1 edificio- Mampostería estructural (winkler) YY

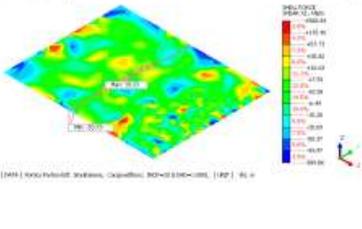
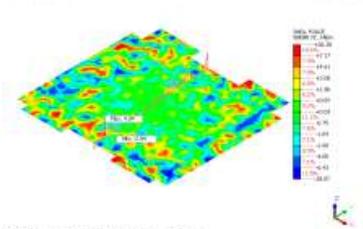
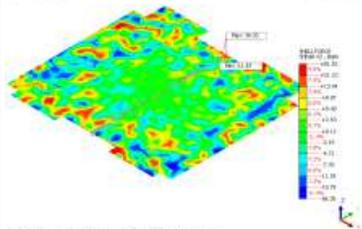
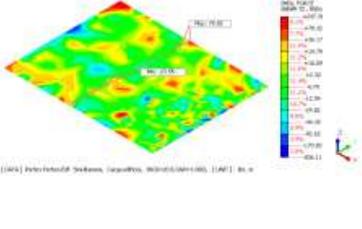
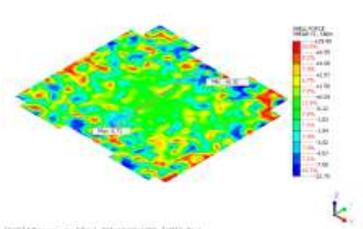
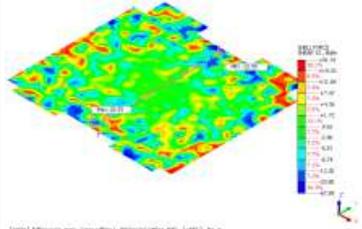
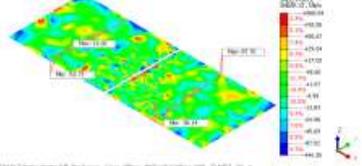
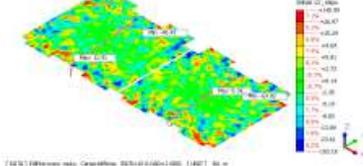
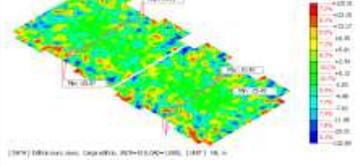
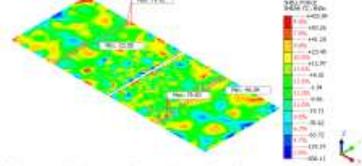
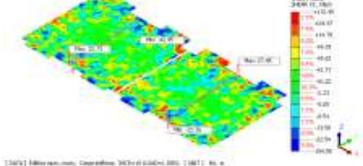
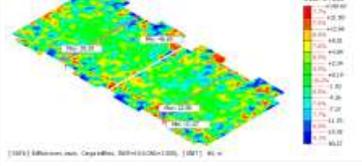
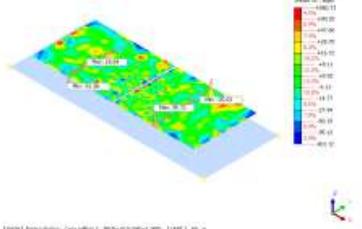
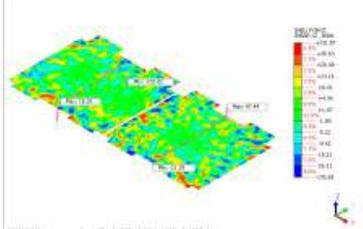
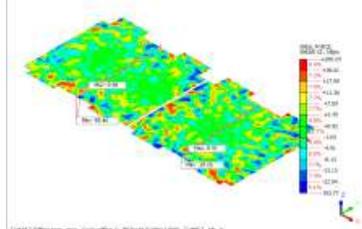
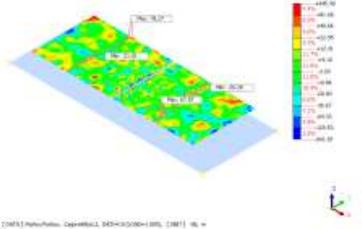
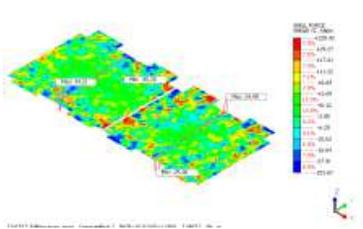
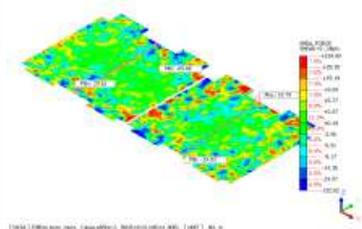
X Z			
Y Z			
<p>1 edificio- porticos en concreto (Elementos Finitos) 1 edificio- muros de carga (Elementos Finitos) 1 edificio- Mampostería estructural (Elementos Finitos)</p>			
X Z			
Y Z			
<p>2 edificio carga simultánea- porticos en concreto (Elementos Finitos) 2 edificio carga simultánea - muros de carga (Elementos Finitos) 2 edificio carga simultánea - Mampostería estructural (Elementos Finitos)</p>			
X Z			
Y Z			
<p>carga 1 edificio primero y luego el otro- porticos en concreto (Elementos Finitos) carga 1 edificio primero y luego el otro - muros de carga (Elementos Finitos) carga 1 edificio primero y luego el otro - Mampostería estructural (Elementos Finitos)</p>			

Tabla 9
Comparativo de resultados de cortante para modelo de elementos finitos

Modelo de elementos finitos												
	Cortante xz						Cortante yz					
	Un edificio		Edificios adyacentes carga simultánea		Edificios adyacentes carga edif. 2 posterior		Un edificio		Edificios adyacentes carga simultánea		Edificios adyacentes carga edif. 2 posterior	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Pórtico en concreto (kN/m)	-389,86	560,84	-444,35	560,84	-401,12	560,73	-836,11	247,31	-836,11	433,04	-841,87	445,3
Muros decarga (kN/m)	-28,57	26,38	-153,15	145,59	-178,59	231,57	-22,7	29,88	-104,55	172,95	-153,67	225,92
Muros en mampostería estructural (kN/m)	-86,35	81,53	-132,89	125,31	-153,77	200,29	-67,89	91,31	-90,27	149,46	-132,02	194,89

De los resultados de las modelaciones mediante elementos finitos listados anteriormente (tabla 9) se determina al comparar los modelos por los tres sistemas estructurales, que la estructura en pórticos en concreto tiene las magnitudes mayores de cortante tanto en “x” como en “y”.

Se estableció, para los esfuerzos cortantes, un incremento en las magnitudes cuando se comparan los casos de un edificio y los edificios adyacentes. Sin embargo, para pórticos en concreto el esfuerzo cortante “xz” mantiene su relación de valor de cortante máximo en el caso de un solo edificio y dos edificaciones adyacentes cargadas simultáneamente, aumentando para la con-

dición en la que se considera la edificación colindante cargada de manera posterior.

De los resultados de las modelaciones por método de Winkler, para los cortantes máximo y mínimo para los ejes “x” y “y”, el sistema estructural de pórticos en concreto tiene mayores magnitudes de esfuerzo cortante que los demás sistemas evaluados.

Los valores de esfuerzo cortante son mayores en los resultados del método de Winkler (tabla 10), en comparación con los resultados de la modelación de elementos finitos. Sin embargo, estos resultados son generales para toda el área de la cimentación, es decir, no se evaluó una sección determinada de cada cimentación.

Tabla 10
Comparativo de resultados de cortante para modelo de Winkler

Modelo de método de Winkler				
	Cortante x		Cortante y	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Pórtico en concreto (kN/m)	-528,17	670,38	-528,17	670,38
Muros de carga (kN/m)	95,18	109,18	-161,09	350,38
Muros en mampostería estructural (kN/m)	-96,62	283,43	-121,93	318,69

Resultados momentos

X X			
	1 edificio- porticos en concreto (Elementos Finitos)	1 edificio- muros de carga (Elementos Finitos)	1 edificio- Mampostería estructural (Elementos Finitos)
X X			
	2 edificio carga simultánea- porticos en concreto (Elementos Finitos)	2 edificio carga simultánea - muros de carga (Elementos Finitos)	2 edificio carga simultánea - Mampostería estructural (Elementos Finitos)
X X			
	carga 1 edificio primero y luego el otro- porticos en concreto (Elementos Finitos)	carga 1 edificio primero y luego el otro - muros de carga (Elementos Finitos)	carga 1 edificio primero y luego el otro - Mampostería estructural (Elementos Finitos)

Tabla 11
Comparativo de resultados de momentos para modelo de elementos finitos

Modelo de elementos finitos												
	Momento xx						Momento yy					
	Un edificio		Edificios adyacentes carga simultánea		Edificios adyacentes carga edif. 2 posterior		Un edificio		Edificios adyacentes carga simultánea		Edificios adyacentes carga edif. 2 posterior	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Pórtico en concreto (kN*m)	-18,77	321,26	-118,98	330,3	-161,7	331,39	-22,97	283,23	-109,37	310,99	-167,4	306,17
Muros de carga (kN*m)	1,05	67,33	-2,83	218,27	-30,26	300,45	1,21	67,34	-1,38	220,38	-39,81	304,8
Muros en mampostería estructural (kN*m)	-2,52	185,85	-2,52	185,85	-26,14	260,58	-1,17	185,75	-1,17	190-45	-33,65	264,34

De los resultados de las modelaciones mediante elementos finitos listados con anterioridad (tabla 11) se determina al comparar los modelos por los tres sistemas estructurales, que la estructura en pórticos en concreto tiene las mayores magnitudes de momento tanto en “x” como en “y”. Se obtiene un incremento en las magnitudes de los máximos momentos de los edificios con colindancia en relación con un solo edificio.

Así mismo, de los resultados de las modelaciones por método de Winkler (tabla 12), para los cortantes máximo y mínimo para los ejes “x” y “y”, el sistema estructural de muros en mampostería tiene mayores magnitudes de cortante que los demás sistemas evaluados.

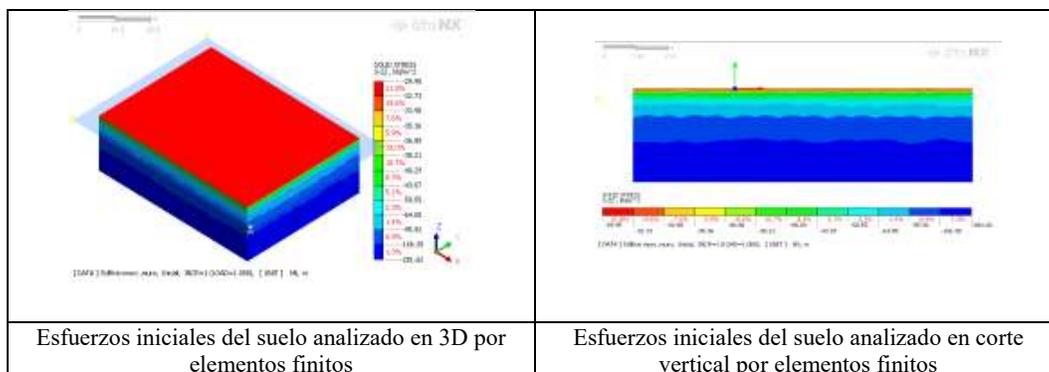
Los valores de cortante son mayores en los resultados del método de Winkler en comparación con los resultados de la modelación de elementos finitos; para

el método de Winkler, se tomaron como referencia los cortantes en el eje F.

Tabla 12
Comparativo de resultados de momentos para el modelo de Winkler

Modelo del método de Winkler				
	Momento xx		Momento yy	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Pórtico en concreto (kN*m)	-715,70	652,00	-724,09	662,67
Muros de carga (kN*m)	-1256,23	1238,36	-1044,45	956,35
Muros en mampostería estructural (kN*m)	-1566,92	1480,00	-1631,47	1539,91

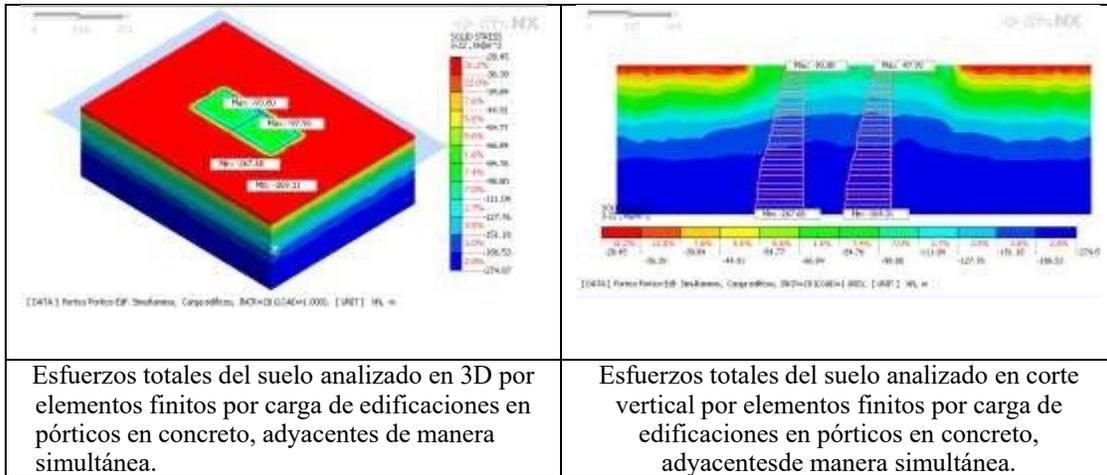
Incrementos de los esfuerzos en profundidad



De acuerdo con los resultados de los análisis de elementos finitos, en las figuras anteriores se ilustran los esfuerzos iniciales del suelo.

Incrementos de los esfuerzos en profundidad para el sistema estructural en pórticos en concreto

A continuación, se ilustran los esfuerzos totales después de colocar las cargas simultáneas de las estructuras superficiales en pórticos en concreto.



A renglón seguido se muestra la variación de los esfuerzos efectivos con respecto a la profundidad. Para los edificios adyacentes, las magnitudes son similares entre estos, teniendo en cuenta que se han cargado simultáneamente (figura 6).

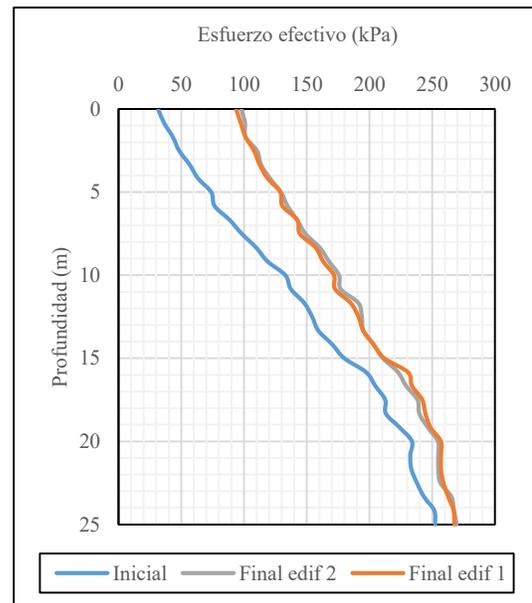
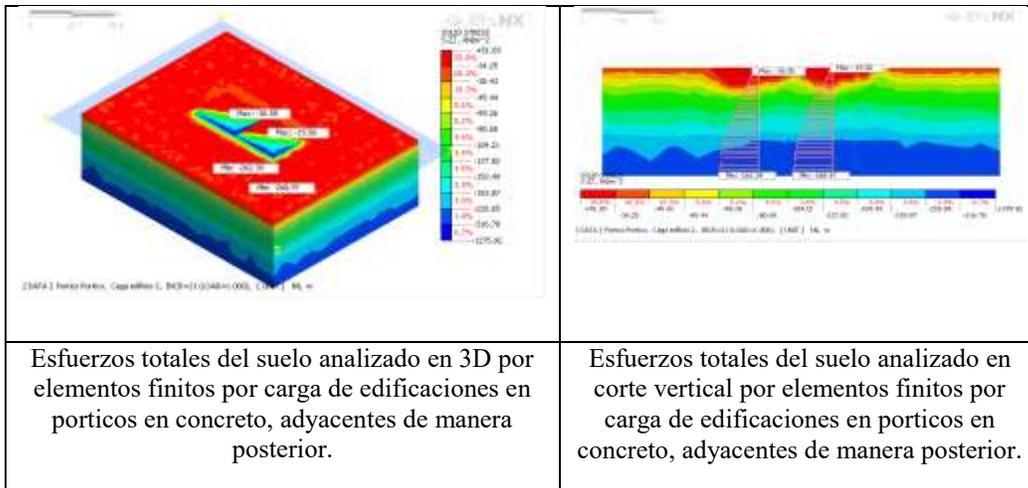


Figura 6. Variación de esfuerzos efectivos en kPa con respecto a la profundidad para estructuras cargadas simultáneamente en pórticos en concreto.

A continuación, se ilustran los esfuerzos totales después de colocar las cargas de manera posterior de las estructuras superficiales en pórticos en concreto.



Seguidamente, se puede ver la variación de los esfuerzos efectivos con respecto a la profundidad. Para los edificios adyacentes, las magnitudes del edificio 1 son mayores en los primeros 5 m de profundidad con respecto al edificio 2, teniendo en cuenta que se han cargado de manera posterior (figura 7).

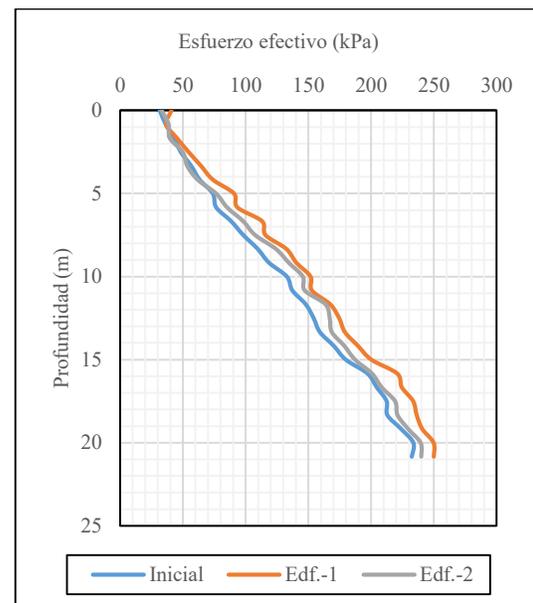
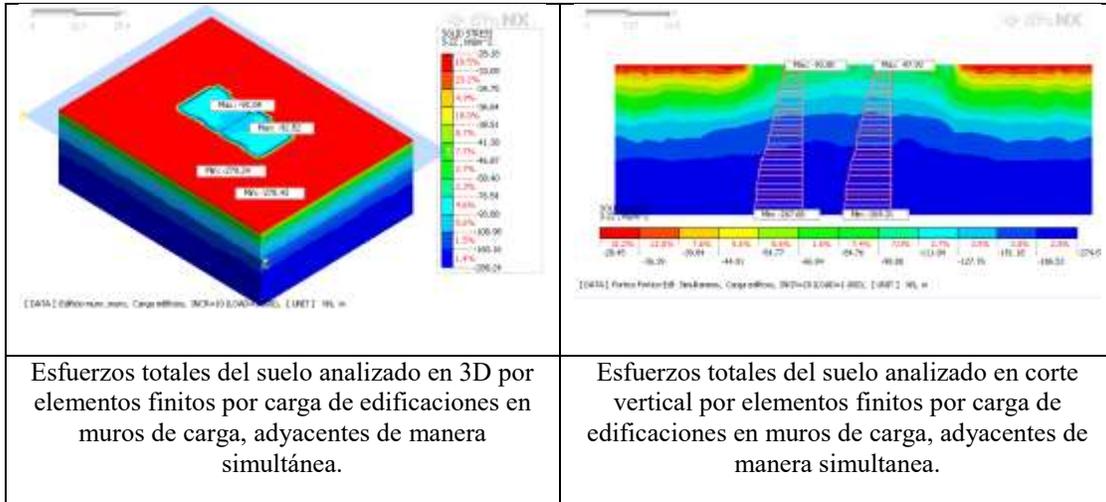


Figura 7. Variación de esfuerzos efectivos en kPa con respecto a la profundidad para estructuras cargadas posteriormente en pórticos en concreto.

Incrementos de los esfuerzos en profundidad para el sistema estructural en muros de carga

A renglón seguido, se ilustran los esfuerzos totales después de colocar las cargas simultáneas de las estructuras superficiales en muros de carga.



En la figura siguiente se puede apreciar la variación de los esfuerzos efectivos con respecto a la profundidad. Para los edificios adyacentes, las magnitudes son similares entre estos, ya que se han cargado simultáneamente (figura 8).

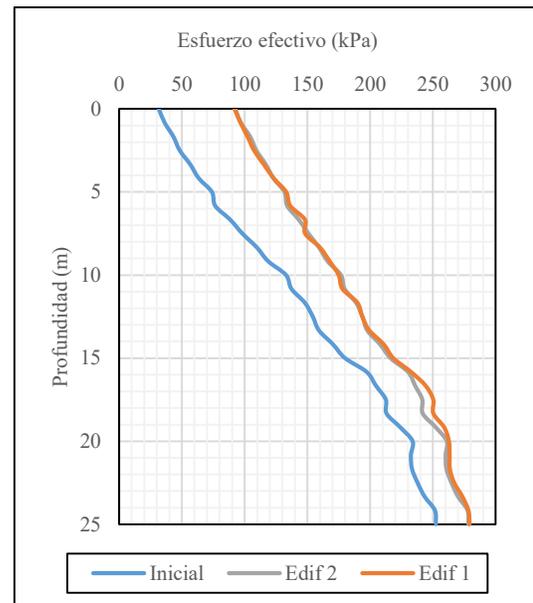
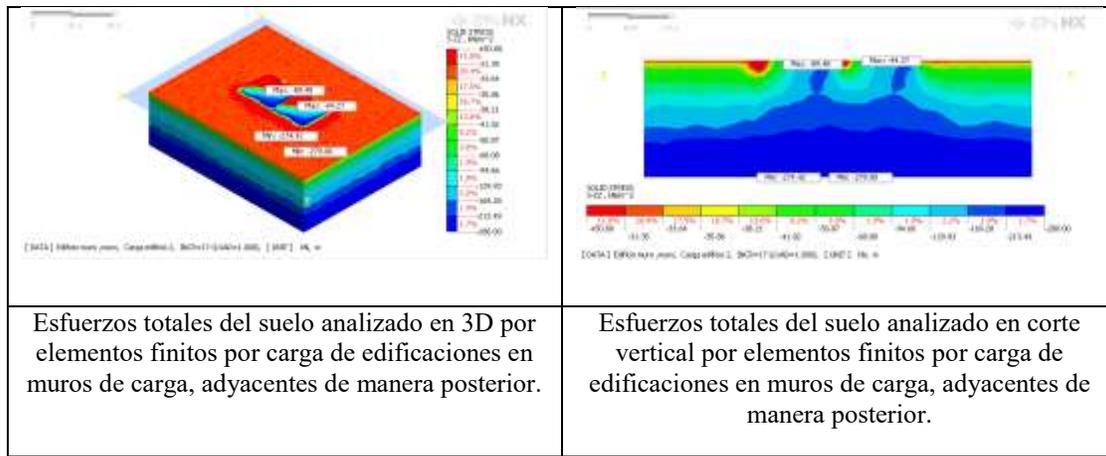


Figura 8. Variación de esfuerzos efectivos en kPa con respecto a la profundidad para estructuras cargadas simultáneas en muros de carga.

A continuación, se ilustran los esfuerzos totales después de colocar las cargas de manera posterior de las estructuras superficiales en muros de carga.



A renglón seguido se muestra la variación de los esfuerzos efectivos con respecto a la profundidad. Para los edificios adyacentes, las magnitudes del edificio 1 son mayores en los primeros 10 m de profundidad con respecto al edificio 2, teniendo en cuenta que se han cargado de manera posterior (figura 9).

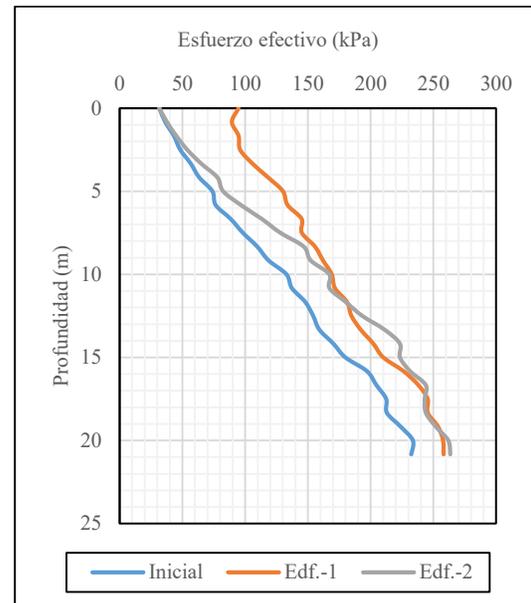
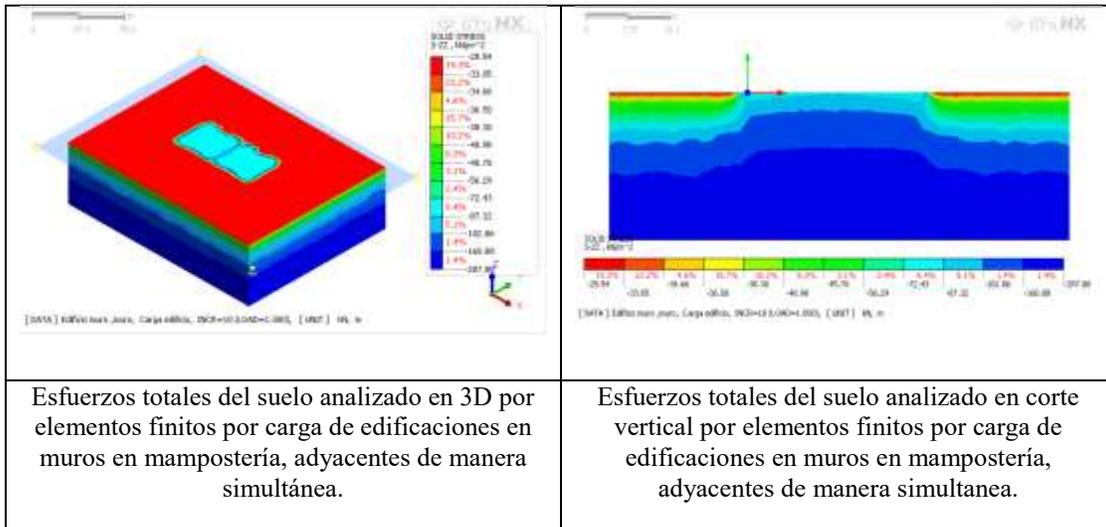


Figura 9. Variación de esfuerzos efectivos en kPa con respecto a la profundidad para estructuras cargadas posteriormente en muros de carga.

Incrementos de los esfuerzos en profundidad para el sistema estructural en muros en mampostería estructural

A continuación, se ilustran los esfuerzos totales después de colocar las cargas simultáneas de las estructuras superficiales en muros en mampostería estructural.



Seguidamente, se puede observar la variación de los esfuerzos efectivos con respecto a la profundidad. Para los edificios adyacentes, las magnitudes son similares entre estos, teniendo en cuenta que se han cargado simultáneamente (figura 10).

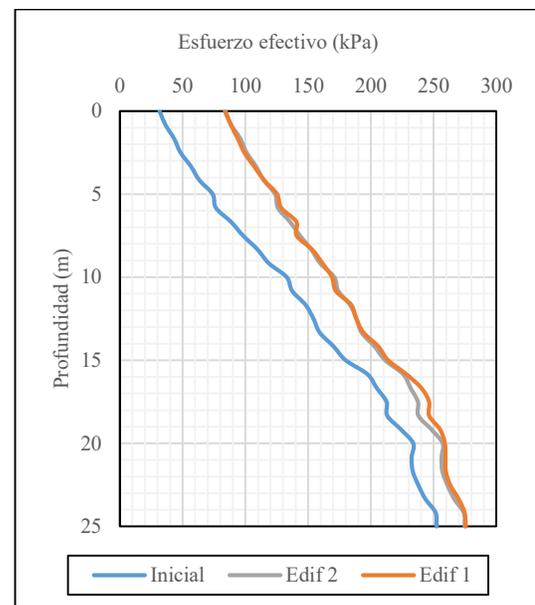
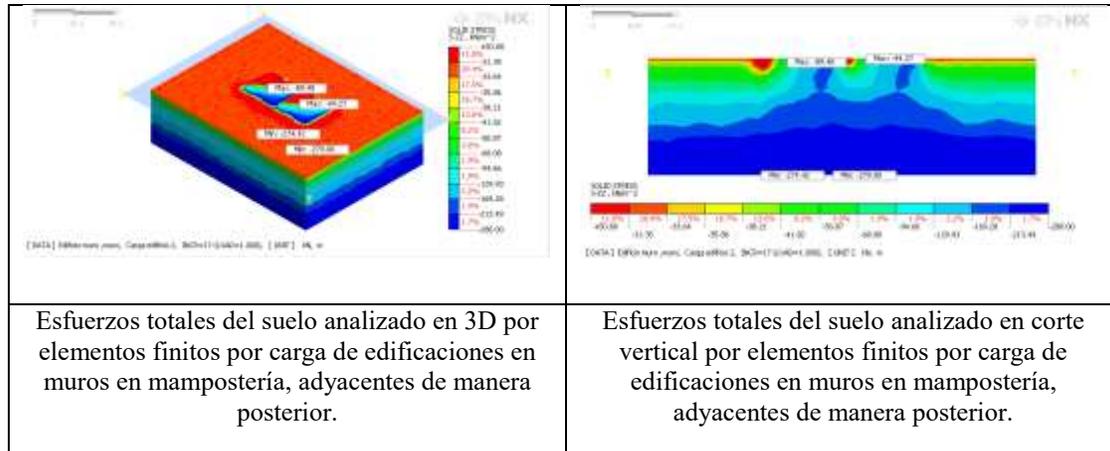


Figura 10. Variación de esfuerzos efectivos en kPa con respecto a la profundidad para estructuras cargadas simultáneas en muros en mampostería.

A renglón seguido, se ilustran los esfuerzos totales después de colocar las cargas de manera posterior de las estructuras superficiales en muros de carga.



Seguidamente, se muestra la variación de los esfuerzos efectivos con respecto a la profundidad. Para los edificios adyacentes, las magnitudes del edificio 1 son mayores en los primeros 10 m de profundidad con respecto al edificio 2, teniendo en cuenta que han sido cargados de manera posterior (figura 11).

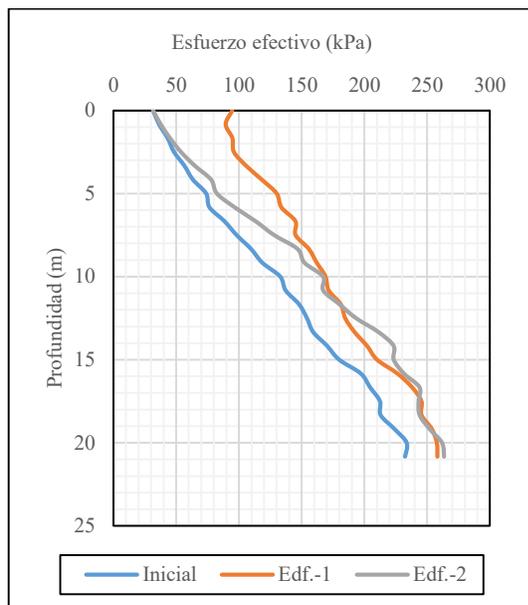


Figura 11. Variación de esfuerzos efectivos en kPa con respecto a la profundidad para estructuras cargadas posteriormente en mampostería.

CONCLUSIONES

- Mediante la modelación basada en el método de Winkler no se pueden evaluar asentamientos totales, dado que el programa empleado SAP2000 V23.1.0. estima asentamientos con base en la configuración geométrica y ejes de la cimentación, pudiendo obtener de estos únicamente asentamientos diferenciales, lo cual, para el análisis de la acción de estructuras adyacentes, es necesario estimar en términos de asentamientos totales las dos edificaciones. Los asentamientos totales obtenidos por la metodología por elementos finitos, al considerar las estructuras adyacentes cargadas en forma simultánea, aumentan, con respecto a la evaluación de solo una edificación; y si se considera la aplicación de la carga de un edificio adyacente de manera posterior, estos asentamientos se incrementan en mayor medida que los dos casos anteriores.
- Las deformaciones cortantes en el suelo, bajo la modelación por elementos finitos, son mayores en el sistema de muros en mampostería estructural, seguido de muros de carga y, en menor porcentaje, para pórticos en concreto; para el caso en que las edificaciones son cargadas de manera simultánea, las deformaciones cortantes disminuyen con respecto a la evaluación de una sola edificación, ya que al ser cargadas simultáneamente, estas funcionan como si fuera una sola placa de cimentación; caso contrario,

cuando se considera la secuencia constructiva de un edificio con respecto al otro, donde se incrementan las deformaciones en las secciones de convergencia de los edificios; para el presente artículo, la separación se consideró a una distancia de 0,30 m de separación entre edificios por requerimiento sísmico estructural.

- El método de Winkler es un método simplificado que permite tener en cuenta la respuesta del suelo de soporte, simulando este como resortes; la relación esfuerzo/deformación no expresa el comportamiento real del suelo, además de que, frente a la acción simultánea de estructuras adyacentes, los incrementos de esfuerzos en el suelo no se pueden representar mediante esta metodología. No obstante, bajo la modelación por elementos finitos, los incrementos en los esfuerzos son inferiores a los esfuerzos como resultado de la modelación por el método Winkler, razón por la cual este método obtiene altos factores de seguridad en el diseño, al ser una metodología conservadora; sin embargo, al considerar la secuencia constructiva de los edificios en la modelación de elementos finitos, el incremento de los esfuerzos cortantes supera los esfuerzos resultado del modelo de Winkler, por lo que se presenta la variación en el edificio cargado inicialmente.
- Los valores de los momentos y cortantes en los ejes “x” y “y” de los resultados obtenidos por la modelación tipo Winkler resultan superiores a la modelación de elementos finitos; sin embargo, cuando los edificios no son cargados simultáneamente y el segundo es cargado de manera posterior, los mayores momentos y cortantes se presentan en el edificio cargado inicialmente. Este comportamiento se ve representado bajo la modelación por elementos finitos únicamente.

REFERENCIAS

- Bogotá, M. D. (2016). *Metro de Bogotá*. Obtenido de Metro de Bogotá: <https://www.metrodebogota.gov.co/?q=estudios>.
- Bowles, J. (1996). *Foundation Analysis and Design* (5th ed.). MacGraw-Hill.
- Geotecnia, S. S. (29 de marzo de 2012). *SCG Sociedad Colombiana de Geotecnia*. Obtenido de SCG Sociedad Colombiana de Geotecnia: <https://www.scg.org.co/quienes-somos/estatutos/>.
- Ingeolab (2013). *Estudio de suelos y recomendaciones de cimentación para la construcción de un edificio de seis pisos y sótano con destino a comercio ubicado en la carrera 13 # 10-83/85/91. Bogotá, D.C.*
- Meyne, F. K. (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. En F. K. Meyne, *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones*. Nueva York: Electric Power Research Institute.
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (2010). En *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10* (pp. H-13).

Estado del arte sobre el comportamiento estructural de muros delgados que forman parte del sistema de resistencia sísmica de edificaciones

State of the art for structural behavior of thin walls which belong to the seismic resistance of buildings

CÉSAR MAURICIO DAZA RODRÍGUEZ¹ - NANCY TORRES CASTELLANOS² -
CARLOS ANDRÉS BLANDÓN URIBE³

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería.
2. Magíster en Estructuras y doctora en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales. Profesora de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
3. Magíster en Ingeniería Civil de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería.

cesar.daza@mail.escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co - carlos.blandon@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 14/09/2021 Aceptado: 20/10/2021

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

Debido a la creciente demanda de vivienda en América Latina en las últimas décadas, se ha venido implementando la construcción industrializada de edificios, constituida por muros de concreto reforzado vaciados en sitio, con espesores que varían entre 80 y 150 mm. Sin embargo, hay estudios que indican que estas edificaciones presentaron un deficiente comportamiento bajo la acción de cargas sísmicas en su plano en los sismos de Chile en 2010 y de Christchurch (Nueva Zelanda) en 2011.

En este artículo se pretende dar a conocer el estado del arte del comportamiento sísmico de muros delgados de concreto reforzado (CR) mediante una revisión de investigaciones analíticas, numéricas y experimentales, con el fin de evaluar las variables que presentan mayor incidencia en el comportamiento sísmico de los muros y así realizar un valorativo general del sistema estructural.

Palabras claves: muro de hormigón, inestabilidad fuera del plano, muro de cortante, muro esbelto, muro delgado.

Abstract

As a result of the increasing housing demand in Latin America in the last decades, the industrialized construction of buildings using on-site poured reinforced concrete walls has been implemented; their thickness vary between 80 and 150 mm. However, studies have pointed out that these buildings show a poor behavior under seismic loads in their plans during both Chile (2010) and Christchurch's (2011) earthquakes. This paper aims at reviewing the state of the art of the seismic behavior of thin RC walls through a revision of analytic, numerical, and experimental research to assess the variables that show a greater incidence in the seismic behavior of walls and perform a general assessment of the structural system.

Keywords: concrete wall, out-of-plane instability, shear wall, slender wall, thin wall.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, se ha vuelto común en muchos países el uso de muros estructurales esbeltos, que abarcan menos espacio en planta y han tomado importancia con la búsqueda de optimización de diseños y espacios arquitectónicos; adicionalmente, los avances en investigación han permitido obtener concretos con altas resistencias a la compresión, que han favorecido también el uso de elementos estructurales más delgados (Dashti, Dhakal, et al., 2020a).

Sin embargo, en Colombia, sobre todo en la última década, el sistema estructural se ha utilizado en condiciones cada vez más exigentes, debido a que el alto costo del suelo y la demanda de vivienda han impulsado la necesidad de construir en una misma área más unidades habitacionales en altura, dando paso a edificaciones que son cada vez más altas y las cuales se encuentran constituidas por muros de CR muy esbeltos. El espesor reducido de estos elementos impide el uso de elementos de borde en la mayoría de los casos, ocasionando que el concreto no se confine de forma adecuada.

Adicionalmente, para reducir costos y aumentar la rapidez de construcción, es usual que el refuerzo de estos muros esté constituido con mallas de refuerzo electrosoldado de acero estirado en frío, proceso que reduce su ductilidad y capacidad de disipación de energía. Todas estas condiciones dan lugar a un sistema constructivo que carece de pruebas de laboratorio o experiencia de desempeño ante eventos sísmicos.

IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

El tema de muros delgados usados en edificaciones de países de Latinoamérica ha cobrado importancia en los últimos años, debido a que los antecedentes mencionados anteriormente conducen a un cuestionamiento sobre el desempeño real de este sistema estructural ante eventos sísmicos, a causa de la posible falta de ductilidad, bajas capacidades de deriva y disipación de energía que pueden desarrollar, pérdidas importantes de rigidez ante niveles bajos de deriva, entre otros motivos.

METODOLOGÍA

A la fecha, se ha llevado a cabo un número considerable de estudios experimentales para evaluar el impacto

de varios aspectos en el comportamiento de muros de concreto reforzado (CR). De las investigaciones experimentales hechas a especímenes completos de muros de las que se hablará en este artículo, la mayoría de los ensayos fueron cíclicos cuasiestáticos a carga lateral, con presencia de carga axial y sin esta, aunque algunos fueron monotónicos. Es importante resaltar que todos los ensayos se hicieron en condiciones que imponen una mayor respuesta por flexión de los especímenes, por lo que la respuesta por cortante no fue de interés en este estudio. Más adelante se resumen las principales características de estas investigaciones experimentales, como la geometría, escala, capas de refuerzo, geometría de los especímenes, rangos de la resistencia a la compresión del concreto, resistencia a la fluencia del acero, cuantía de refuerzo longitudinal, cuantía de refuerzo longitudinal del elemento de borde y protocolo de carga (tabla 1).

Igualmente, en la bibliografía especializada se registra una cantidad significativa de ensayos a especímenes prismáticos de CR que se efectuaron con el fin de estudiar la estabilidad y otros aspectos del comportamiento de los elementos de borde de muros de CR. A lo largo del presente artículo se hace referencia a este tipo de investigaciones que en la mayoría de los ensayos fueron cíclicos reversibles a carga axial, aunque algunos fueron monotónicos a carga axial de compresión. Se resumen además las principales características de estas investigaciones experimentales, como la geometría de los especímenes, escala, dimensiones, rangos de la resistencia a la compresión del concreto y resistencia a la fluencia del acero, cuantía de refuerzo longitudinal del elemento de borde y protocolo de carga (tabla 2).

En este artículo también se hace referencia a investigaciones que se realizaron mediante análisis numéricos basados en modelaciones con *software* de elementos finitos y en las que se evaluó el efecto de diferentes variables en el comportamiento sísmico de muros de CR. Cabe destacar que, en cada una de estas investigaciones, los modelos numéricos fueron previamente validados con los resultados de estudios experimentales a muros de CR. Más adelante se resumen también las principales características de estas investigaciones experimentales, como la geometría de los especímenes, escala, capas de refuerzo, dimensiones, rangos de la resistencia a la compresión del concreto y resistencia a la fluencia del acero, cuantía de refuerzo longitudinal del elemento de borde y protocolo de carga (tabla 3).

Tabla 1
Resumen de características de especímenes de investigaciones hechas mediante muros completos

Referencia	Geometría	Escala	Capas de refuerzo	Longitud ^a (mm)	Espesor (mm)	H ^h (mm)	f _c (MPa)	f _y (MPa)	ρ _w (%)	ρBE (%)	Protocolo de carga
Niroomandi, 2018; Niroomandi et al., 2021	Rectangular	1:2	2	1600	125	2200	47 a 53	278 a 548	1,11	4,15	Tres direcciones
R. Hout, Appelle et al., 2020	C	1:1	1	1050 x 1300x1050 ^a	100	4250	29 a 32	475 a 523	0,30	3,02 ^c	Cargas cíclicas horizontales en diferentes direcciones
Vélez, 2020; Vélez et al., 2017	T	1:1	1	2500 x 350 ^b	100	2400	39 y 40	419 a 723	0,26 y 0,27	N/A	Cargas cíclicas cuasiestáticas en el plano
Almeida et al., 2017	T	2:3 y 1:1	1 a 2	2700 x 440 ^b	80 a 120	2000	29 a 51	460 a 565	0,15 a 0,50	0,50 a 2,63	Cargas cíclicas cuasiestáticas en el plano y fuera del plano
Blandón et al., 2018	T	1:1	1	2500 x 350 ^b	100	2400	39 a 47	419 a 723	0,26 y 0,27	N/A	Cargas cíclicas cuasiestáticas en el plano
Blandón & Bonett, 2020	Rectangular	1:1	1	1200	80	2400	21	454 a 675	0,20	3,10 ^c	Cargas cíclicas cuasiestáticas en el plano
Ortega et al., 2021	Rectangular	1:1	1	1200	100	2400	24	493 a 533	0,25 y 0,26	1,46 ^c	Cargas monotónicas y cíclicas cuasiestáticas en el plano
Dashti, Tripathi, et al., 2020, Dashti et al., 2018b	Rectangular	1:2	2	1600 y 2000	125 y 135	2000	35 a 41	330 a 411	0,59 a 1,21	2,60 a 4,30	Cargas cíclicas cuasiestáticas en el plano
Tripathi, Dhakal, & Dashti, 2020	Rectangular	1:2	2	2000	150	2000	36 a 104	258 a 377	0,55	2,28	Cargas cíclicas cuasiestáticas en el plano
Shegay et al., 2018	Rectangular	1:2	2	2250	200	3500	33 a 44	393 a 543	0,46 a 0,52	1,30 a 2,70	Cargas cíclicas estáticas en el plano
Hube et al., 2020	Rectangular	1:1	1	1600	80 a 100	1600	29 ^d	446 a 624	0,14 a 0,26	0,30 a 0,80	Cargas cíclicas estáticas en el plano
Moscoso et al., 2021	Rectangular	N/E	2	900	150	2000	23 a 35	693 a 775	0,39	0,34 ^e	Cargas cíclicas cuasiestáticas en el plano
Lu et al., 2018	Rectangular	1:1	2	1400	150	2800	36 a 37	322 a 387	0,47	0,72 a 1,44	Cargas cíclicas estáticas en el plano

^a Las dimensiones se encuentran dadas en formato (longitud de la aleta x longitud del alma x longitud de la aleta). ^b Para conocer las dimensiones de las aletas de la "T", consultar el artículo completo. ^c Refuerzo concentrado en el extremo del elemento, pero no corresponde propiamente a un elemento de borde de confinamiento. ^d Resistencia a la compresión del concreto promedio medida experimentalmente, que se reporta en la investigación. ^e Refuerzo agrupado en los extremos del muro, aunque no conforman propiamente un elemento de borde de confinamiento debido a la ausencia de refuerzo de confinamiento. ^f Se utilizaron diferentes disposiciones de refuerzo (distribuido y concentrado) que conducen a diversas cuantías ρBE. ^g Longitud del espécimen de prueba, que en ocasiones puede incluir alas y retrocesos para muros no rectangulares. ^h Altura de los especímenes de prueba. ⁱ Puede incluir especímenes con refuerzo de alambre electrosoldado y refuerzo con barras convencionales. ^j Para la parte experimental de la investigación si se indica explícitamente que se emplean cargas cíclicas cuasiestáticas. N/E = No especificado o no identificado.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2
Resumen de características de especímenes de investigaciones hechas mediante prismas que idealizan elementos de borde

Referencia	Geometría	Escala	Dimensiones ^a (mm)	f _c (MPa)	f _y (MPa)	ρBE (%)	Protocolo de carga
Chrysanidis, 2019	Columna	1:3	150 x 75 x 760	21 a 23	552 a 604	1,79 a 3,19	Dos ciclos de cargas axiales monotónicas (tracción y compresión) ^b
Chrysanidis, 2020	Columna	1:3	150 x 75 x 760	28	666	4,12	Dos ciclos de cargas axiales monotónicas (tracción y compresión) ^b
Chrysanidis, 2021	Columna	1:3	150 x 75 x 760	21 a 23	666 a 743	1,79 a 10,72	Dos ciclos de cargas axiales monotónicas (tracción y compresión) ^b
Rosso et al., 2018	Columna	1:1	300 x 80 x 2400 y 300 x 100 x 2400	24 a 34	475 a 566	0,35 a 3,80	Cargas axiales de tensión y compresión cíclicas cuasiestáticas
Tripathi, Dhakal, Dashti et al., 2020	Columna	1:2	330 x 150 x 1200	28 a 40	302 a 509	2,28 a 3,25	Cargas axiales de tensión y compresión cíclicas cuasiestáticas

^a Dimensiones expresadas en formato [largo x Ancho x Alto]. ^b Consistió en un primer ciclo de carga de tracción uniaxial hasta un determinado alargamiento (deformación unitaria), y luego un ciclo de carga de compresión concéntrica hasta llegar a la rotura; ambos ciclos de carga se aplicaron gradualmente mediante cargas monotónicas.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3
Resumen de características de especímenes de investigaciones hechas mediante modelaciones

Referencia	Geometría	Escala	Capas de refuerzo	Longitud (mm)	Espesor (mm)	H ^d (mm)	f _c (MPa)	f _y (MPa)	ρ _w (%)	ρBE (%)	Protocolo de carga
R. D. Hoult, 2019	C	1:1	2	1600 x 2000 x 1600 1600 x 3000 x 1600 2100 x 2000 x 2100 ^a	200	3500	32	492 a 563	1,00 ^c	1,00 a 1,13 ^c	Múltiples direcciones (modelación con EF)
Rosso et al., 2020	T	2:3 y 1:1	1 a 2	2700 x 440 ^b	80 a 120	2000	29 a 51	460 a 565	0,15 a 0,50	0,50 a 2,63	Múltiples direcciones (modelación con EF)
R. D. Hoult & Beyer, 2020	C	1:1	2	1050 x 1300 x 1050 ^a	100 a 150	2950	55 a 78	471 a 518	0,22 a 0,35 ^c	2,00 a 4,50 ^c	Múltiples direcciones (modelación con EF)
Dashti, Dhakal et al., 2020a	Rectangular	1:2	1 y 2	1600 y 2000	125 y 135	2000	35 a 41	330 a 411	0,59 a 1,21	2,60 a 4,30	Cargas cíclicas estáticas en el plano (modelación con EF)
Dashti et al., 2018a	T	1:1	1	2700 x 440 ^b	80	2000	29	460 a 565	0,15	2,63	Cargas cíclicas estáticas en el plano (modelación con EF)

^a Las dimensiones se encuentran dadas en formato (longitud de la aleta x longitud del alma x longitud de la aleta). ^b Para conocer las dimensiones de las aletas de la "T" consultar el artículo completo. ^c Se utilizaron diferentes disposiciones de refuerzo (distribuido y concentrado) que conducen a diversas cuantías ρBE. ^d Altura de los especímenes de prueba. ^e Puede incluir especímenes con refuerzo de alambre electrosoldado y refuerzo con barras convencionales.
Fuente: Elaboración propia.

Otras investigaciones analíticas que se estudiaron en este artículo fueron las siguientes: Rosso et al., 2015; Parra & Moehle, 2017; Shegay et al., 2019; Shegay et al., 2020; Dashti, Dhakal et al., 2020b; Dashti et al., 2021; Tripathi & Dhakal, 2021, y Abdullah & Wallace, 2019, en las que se analizan múltiples aspectos en el comportamiento de muros de CR. En sus investigaciones analíticas, J. P. Almeida et al. (2017) y Tarquini et al. (2017) estudiaron el comportamiento de los traslapes en muros de CR.

Finalmente, las investigaciones de Arroyo et al. (2021), Cando et al. (2020), Ramos & Hube (2020), Vásquez et al. (2020) y Ramos & Hube (2021) que se analizan en este documento se efectuaron mediante modelaciones numéricas de edificaciones conformadas por muros de CR.

A continuación, se analizarán los aspectos que se deberán considerar en el estudio del comportamiento sísmico de los edificios con muros delgados de CR, elegidos a criterio de los autores debido al impacto que tienen en el comportamiento sísmico, de acuerdo con las evidencias científicas disponibles más actuales encontradas en la bibliografía.

Algunos aspectos por discutir dependen de la geometría del muro y propiedades de los materiales, al tiempo que otros aspectos que se discutirán se encuentran relacionados con efectos externos (solicitaciones).

Finalmente, se tratarán aspectos que se relacionan con el comportamiento esperado del elemento.

ASPECTOS QUE INCIDEN EN EL COMPORTAMIENTO DE MUROS DELGADOS QUE DEPENDEN DE LA GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DEL MURO

Cuantía de refuerzo del elemento de borde

Con respecto al efecto de las cuantías de refuerzo longitudinales de los elementos de borde en la inestabilidad lateral de los muros, Chrysanidis (2021) analiza el efecto en prismas con cuantías de refuerzo longitudinal que variaban desde 1,79 % hasta 10,72 %.

Como resultado de esta investigación se encontró que el incremento en la cuantía de refuerzo no cambia el modo de falla y en todos los casos se termina dando por el pandeo del refuerzo, y aunque un aumento en la cuantía de refuerzo longitudinal conduce a un incremento de la carga de falla en compresión, esto solo ocurre cuando se emplean la misma disposición

y el mismo número de barras de refuerzo; por ejemplo, para elementos con cuantías del 2,68 %, 3,18 % y 3,68 % donde se emplearon seis barras de refuerzo en cada espécimen, se produjeron capacidades de cargas axiales de 170 kN, 180 kN y 200 kN, respectivamente; no obstante, al probar un espécimen con una cuantía mayor de 4,02 % en el que se reduce el número de barras longitudinales de seis a cuatro, se observó que decrece la capacidad de carga última a 160 kN, por lo que un incremento en la cuantía no siempre conduce a un aumento en la capacidad a compresión del muro, y la distribución y el diámetro de las barras longitudinales parecieron afectar significativamente la capacidad a compresión que lleva a la falla por inestabilidad lateral.

Rosso et al. (2020), por su parte, analizaron el comportamiento fuera del plano para tres cuantías de refuerzo diferentes: ρ_{BE} de 0,98 %, 2,51 % y 4,75 %. Se encontró que cuando se utiliza la cuantía de refuerzo del elemento de borde más pequeña, la deriva máxima en el plano alcanzada antes del fallo fuera del plano es casi dos veces mayor que en los otros dos casos. De igual manera, la deformación crítica de tracción experimentada por el elemento de borde antes del fallo aumenta sustancialmente cuando se utilizan cuantías de refuerzo pequeñas; por ejemplo, se obtuvieron $\epsilon_{glob,cr}$ de 1,9 %, 1,1 % y 0,9 % para cada una de las cuantías ρ_{BE} anteriores, respectivamente, por lo que se puede afirmar que la cuantía de refuerzo de los elementos de borde tiene una incidencia directa también en la deformación fuera del plano, siendo más beneficioso tener cuantías de refuerzo pequeñas, como lo observaron también Rosso et al. (2018), Dashti & Dhakal et al. (2020a), Shegay et al. (2020), Tripathi, Dhakal & Dashti et al. (2020) y Dashti et al. (2021).

Disposición del refuerzo longitudinal en los elementos de borde

Rosso et al. (2020) estudiaron el efecto de esta variable modelando dos muros de CR con la misma geometría y cuantía de refuerzo en los elementos de borde, pero con disposición del acero de refuerzo vertical distribuido en una o dos capas (figura 1), encontrando que el modelo del muro con una sola capa de refuerzo falló durante el primer ciclo a una deriva del -1,00 % debido a la inestabilidad fuera del plano, mientras que el muro de doble capa de refuerzo falló durante el primer ciclo a

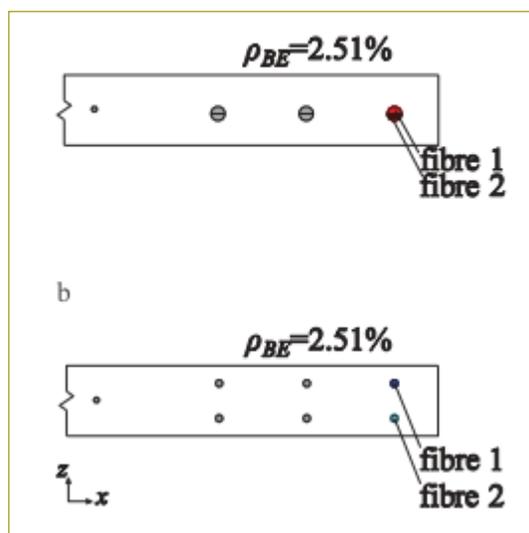


Figura 1. Distribución del refuerzo vertical del elemento de borde (tomada de Rosso et al., 2020).

una deriva del $-1,25\%$, después de haber recuperado una gran deformación fuera del plano.

La deformación de tracción ($\epsilon_{glob, cr}$), experimentada antes de la rotura del refuerzo en el muro con refuerzo dispuesto en dos capas fue de $1,67\%$, en comparación con el $1,30\%$ que alcanzó el muro con una capa de refuerzo, lo que representa un aumento aproximado del 28% . Algo similar ocurrió con el desplazamiento fuera del plano alcanzado al descargar y recargar en compresión, ya que fue mucho mayor en el muro con una sola capa de refuerzo que en el de dos capas (20 mm y 7 mm , respectivamente), por lo que se concluye que el muro con una sola capa de refuerzo alcanza el fallo a una deriva menor, sufre una rotura del refuerzo a una menor deformación unitaria de tracción crítica ($\epsilon_{glob, cr}$) y desarrolla un mayor desplazamiento fuera del plano al descargar y recargar en compresión, en comparación con el muro con dos capas de refuerzo. Algo similar a lo anterior encontraron Dashti et al. (2018b).

Por esto se puede afirmar que la fluencia asincrónica de las barras de refuerzo longitudinal ya descrita contribuye al progreso de la deformación fuera del plano en forma más gradual en muros doblemente reforzados, en comparación con muros reforzados de manera individual.

Detallado del refuerzo transversal en el elemento de borde

En Tripathi, Dhakal, Dashti et al. (2020), se encontró que el esfuerzo de fluencia del acero, la separación,

disposición y cuantía volumétrica del refuerzo transversal tuvieron un efecto importante en la respuesta a la compresión axial de los elementos de borde.

Shegay et al. (2018), a su vez, hallaron que el comportamiento de los elementos de borde fue indiferente a detallados de refuerzo transversal con estribos cerrados de confinamiento o ganchos suplementarios con doblez a 180° . No obstante para Abdullah & Wallace (2019) la capacidad de deriva de los elementos de borde con un solo estribo cerrado de confinamiento perimetral y ganchos suplementarios con ambos dobleces de más de 135° (figura 2a) es ligeramente superior a elementos de borde con un solo estribo cerrado de confinamiento perimetral y ganchos suplementarios con dobleces alternados de 90° y 135° (figura 2b); sin embargo, ninguna de estas dos configuraciones anteriores es tan estable y eficaz en compresión como el uso de estribos cerrados de confinamiento superpuestos (figura 2c), debido a que los ganchos suplementarios con dobleces de 90° o 135° fueron propensos a abrirse y, por lo tanto, a generar el pandeo de las barras longitudinales de refuerzo y el aplastamiento del concreto.

Cuantía de refuerzo del alma del muro

El efecto de la cuantía de refuerzo longitudinal del alma del muro puede tomar menor importancia que la del elemento de borde en el comportamiento sísmico de muros de CR. Por ejemplo, en Rosso et al. (2020) se estudió la respuesta a la inestabilidad fuera del plano para tres especímenes en los que se variaron únicamente las cuantías de refuerzo del alma: $\rho_w = 0,18\%$, $0,25\%$, y $0,35\%$. De esto se deduce que los tres especímenes fallan debido a la inestabilidad global fuera del plano aproximadamente después de la misma deriva en el plano, además de que el fallo se produce para la misma $\epsilon_{glob, cr} = 1,10\%$.

De este modo, se puede afirmar que posiblemente la deformación por tracción crítica que desencadena el fallo no se ve tan influenciada por la cuantía de refuerzo del alma de un muro, sino de la cuantía de los elementos de borde, como se describió anteriormente.

Influencia del espesor del muro

El espesor del concreto de recubrimiento puede retrasar o acelerar la propagación del pandeo, debido a que

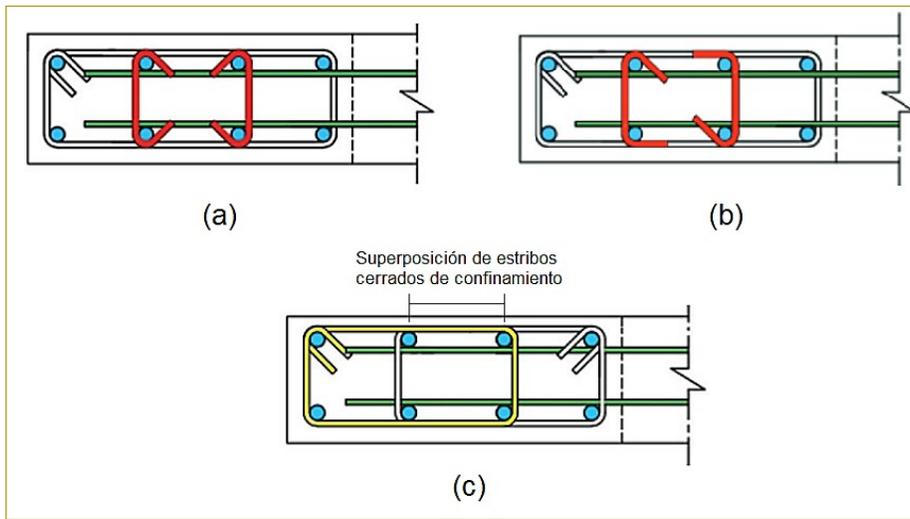


Figura 2. Ejemplos de tipologías de confinamiento del elemento de borde: a) Estribos cerrados de confinamiento superpuestos. b) Estribo cerrado de confinamiento perimetral y ganchos suplementarios (adaptado de Abdullah & Wallace (2019).

puede brindar una resistencia mayor o menor contra el pandeo a las barras de refuerzo longitudinal (Tripathi, Dhakal, Dashti et al., 2020).

Por otra parte, Dashti, Dhakal et al. (2020a) aseguran que al disminuir el espesor en muros que contengan dos capas de refuerzo, se reduciría la separación del refuerzo, y por lo tanto, sería más propensa a la deformación fuera del plano ya que el brazo de palanca entre las dos capas de refuerzo que resisten la deformación fuera del plano en la sección disminuiría, y de esta manera, también se reduciría la deformación crítica de tracción correspondiente con el inicio de la deformación fuera del plano. Así mismo, distancias de separación del refuerzo muy pequeñas en muros doblemente reforzados hacen que su comportamiento se parezca más al de muros reforzados con una sola capa.

Rosso et al. (2020) estudiaron el efecto de la inestabilidad fuera del plano para tres espesores de muro (80 mm, 100 mm y 150 mm) y se observaron que, al aumentar el espesor un 25 % (de 80 a 100 mm), se produce un incremento aproximado del 63 % de la deformación crítica de tracción necesaria para desencadenar la inestabilidad fuera del plano (eglob,cr de 1,10 a 1,80 %, para el espesor de 80 y 100 mm, respectivamente) y de la deriva en el plano que el muro pudo soportar antes de fallar fuera del plano; un incremento del 50 % del espesor (de 100 a 150 mm) condujo a mecanismos de fallo diferentes debido a que el muro de 100 mm desarrolló un mecanismo de fallo fuera del plano, y aunque el muro de 150 mm desarrolló un gran desplazamiento fuera del plano, el fallo se terminó

dando por aplastamiento del concreto en compresión (inestabilidad local); de igual forma, el muro de 150 mm pudo alcanzar más ciclos con incrementos de deriva en el plano y la deformación crítica de tracción fue de 3,30 %. Esta observación confirma que el aumento del espesor reduce la vulnerabilidad a la inestabilidad fuera del plano y guarda similitud con algunos modelos mecánicos existentes, en los que la deformación crítica a la tracción es directamente proporcional al espesor del muro. Todo esto coincide con lo manifestado por Rosso et al. (2018); Dashti, Dhakal et al. (2020a); Shegay et al. (2020); Dashti, Tripathi et al. (2020), y Dashti et al. (2021) sobre el efecto del espesor del muro.

Otra medida secundaria para mejorar el comportamiento sísmico de muros de CR, cuando por razones arquitectónicas no sea posible aumentar el espesor completo del muro, consiste en implementar secciones con elementos de mayor espesor en los extremos del muro, ya que la inestabilidad fuera del plano está precedida de la deformación por tracción generada en los extremos del muro (Rosso et al., 2020).

Influencia de la altura libre y condiciones de apoyo del muro

Para investigar la influencia de la altura de entrepiso, Rosso et al. (2020) estudiaron este parámetro en tres muros de CR (2,00 m, 2,40 m y 2,80 m) con una sola capa de refuerzo y lo sometieron a cargas estáticas cíclicas en el plano. Como resultado, se obtuvo que la deriva máxima en el plano alcanzada antes de que

se generara una falla por inestabilidad fuera del plano para las tres configuraciones fue similar; no obstante, al variar la altura de 2,00 a 2,40 m y de 2,40 a 2,80 m, se condujo en cada caso a una disminución aproximada de la deformación crítica del 20 %; es decir, el muro de 2,00 m experimentó una deformación crítica a tracción de 1,10 %, el muro de 2,40 m una deformación de 0,90 % y, finalmente, el muro de 2,80 m sufrió una deformación de 0,70 %. Por lo tanto, la altura libre de entrepiso influye en la inestabilidad fuera del plano, como también lo afirman Dashti, Dhakal et al. (2020a).

La rotación y las condiciones de apoyo que brindan los elementos de arriostramiento de un muro de CR, tales como vigas o losas en el sistema industrializado, pueden incidir en el desarrollo de la inestabilidad fuera del plano. En la práctica constructiva general, el vaciado monolítico de muros de CR con la cimentación indicaría una condición de apoyo similar a un empotramiento en la parte inferior; sin embargo, la conexión del muro con la losa o el elemento de arriostramiento podría representar en la realidad una combinación entre articulación y empotramiento.

Para analizar este efecto, Rosso et al. (2020) utilizaron dos configuraciones de muros a las que se impuso una rotación inicial a media altura del elemento de arriostramiento superior de $0,3^\circ$ y $0,6^\circ$ (correspondientes a 0,005 y 0,01 radianes, en ese orden), antes de aplicar el protocolo habitual de cargas estáticas cíclicas en el plano. Como resultado, se encontró que cuanto mayor es la rotación impuesta, mayor es el desplazamiento fuera del plano resultante, en tanto que la deformación crítica de tracción que desencadena el fallo fuera del plano disminuye aproximadamente el 10 % y el 30 % para las rotaciones de $0,3^\circ$ y $0,6^\circ$, respectivamente.

Así las cosas, se puede concluir que la rigidez y la rotación del elemento de arriostramiento del muro pueden desempeñar un papel clave en su comportamiento frente a la inestabilidad fuera del plano. Por otra parte, las condiciones de apoyo empotrado-articulado pueden generar un desplazamiento fuera del plano dos veces mayor en comparación con las condiciones de apoyo empotrado-empotrado (Dashti, Dhakal et al., 2020a).

Influencia de la longitud del muro

El comportamiento y los mecanismos principales de resistencia a cargas laterales en los muros se suelen

clasificar convencionalmente por la relación de aspecto (H_w/L_w). Los muros con una relación de aspecto mayor o igual que 2, se clasifican como muros esbeltos (*slender*, en inglés) y aquellos con una relación de aspecto menor que 2 se clasifican como muros alargados (*squat*, en inglés). El comportamiento de un muro esbelto generalmente se encuentra dominado por la flexión, y no tendrá una respuesta inelástica significativa a cortante; por el contrario, un muro alargado tendrá una respuesta controlada por el cortante (Moehle, 2015). En este sentido, la longitud de un muro es un parámetro de estudio que hay que considerar en el comportamiento sísmico que pueden tener los muros de CR.

Con respecto al efecto de la longitud del muro en la respuesta ante la inestabilidad fuera del plano, Dashti et al. (2018a), Dashti, Dhakal et al. (2020a) y Dashti, Tripathi et al. (2020) encontraron que aumentos en la longitud de los muros dan lugar al desarrollo de mayores deformaciones de tracción en el acero de refuerzo longitudinal, por lo que los muros más largos son más vulnerables a la inestabilidad fuera del plano.

Influencia de la resistencia a la compresión del concreto

De acuerdo con la investigación experimental y numérica realizada a muros de CR a media escala por Tripathi, Dhakal & Dashti (2020), la capacidad de deformación de los muros de CR puede mejorarse aumentando la resistencia a la compresión del concreto, debido a que incrementa la energía histerética disipada por los muros durante los ciclos de carga anteriores al fallo, cuando se someten a cargas laterales. Así mismo, el incremento de la resistencia a la compresión del concreto reduce las demandas de deformación inelástica en la base del muro, permitiendo que se retrase el inicio de modos de fallo locales, como el desprendimiento del recubrimiento de concreto, pandeo de las barras longitudinales de refuerzo y aplastamiento del concreto.

En el estudio de Tripathi, Dhakal & Dashti (2020) también se encontró que los muros de alta resistencia a la compresión (80 MPa) mostraron un fallo final debido al desarrollo de una inestabilidad fuera del plano (tanto local como global) en comparación con los muros de resistencia normal (30 MPa), que perdieron capacidad de carga debido al desarrollo de una inestabilidad localizada fuera del plano.

El desarrollo del pandeo de las barras de refuerzo longitudinal y la deriva correspondiente a su inicio se vieron favorecidos también por el uso de concreto de alta resistencia (80 MPa), debido a que esto dio lugar a una reducción de las demandas de deformación por compresión en el concreto (ya que pequeñas profundidades del bloque de esfuerzos de compresión del concreto eran adecuadas para equilibrar las fuerzas de tracción), de modo tal que se retrasó el inicio del pandeo en estos muros. Por el contrario, en los muros con resistencia a la compresión normal (30 MPa), ante niveles de deriva elevados, las grandes demandas de deformación inelástica de tracción y compresión en la base del muro causaron modos de fallo, como el pandeo y fractura de barras, y aplastamiento del concreto; todo esto llevó a provocar fallos a causa de una inestabilidad localizada fuera del plano (Tripathi, Dhakal & Dashti, 2020).

Influencia del tipo de refuerzo

Es usual que el refuerzo de estos muros de CR esté constituido con mallas de refuerzo electrosoldado de acero estirado en frío, con el fin de reducir costos y aumentar la rapidez de construcción en la ejecución habitual de edificaciones de muros de CR del medio colombiano. Debido a la naturaleza del proceso de trefilado mediante el cual se lamina en frío este acero de refuerzo, el alambre sufre una deformación inicial que implica reducciones en la capacidad de deformación y aumentos en la resistencia a fluencia.

En varios ensayos experimentales se han constatado las limitaciones de la malla electrosoldada como refuerzo de muros (Carrillo et al., 2017; Blandon et al., 2018; Blandón & Bonett, 2020); en otros estudios (Arroyo et al., 2021) se reportó el comportamiento sísmico de edificios de muros delgados de CR con malla de alambre electrosoldado y barras de acero de refuerzo convencional, a través de la modelación no lineal de un edificio de seis pisos diseñado y construido en 2011 en Bogotá bajo la NSR-10 (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, 2010), cuyas características son típicas del sistema industrializado debido a que la altura libre entre pisos es de 2,45 m; los muros estructurales son de 100 mm de espesor, se encuentran reforzados con una malla de alambre electrosoldado y se conectan mediante losas de CR de 100 mm de espesor.

En este estudio se encontró que mientras el edificio reforzado con barras corrugadas soportó la deriva límite del 1,00 %, el edificio reforzado con mallas electrosoldadas no alcanzó siquiera derivas del 0,60 %, debido a la ruptura prematura del refuerzo.

Arroyo et al. (2021) presentan las siguientes recomendaciones relacionadas con su uso: a) evitar el empleo de mallas de alambre electrosoldado en muros con secciones con geometrías no rectangulares (por ejemplo, muros en forma de T, C o I), ya que dichas mallas podrían fracturarse por tracción antes de que la fibra extrema en compresión alcance sus valores límite de $\epsilon_c = 0,003$; b) evitar el uso de mallas de alambre electrosoldado en muros delgados de CR rectangulares, o utilizar barras de acero al menos en el tercio inferior de los muros en las zonas en las cuales el edificio va a ser sometido a grandes demandas de deformación; c) restringir a tres pisos el límite de altura de los edificios con muros delgados de CR reforzados con mallas electrosoldadas en zonas de riesgo sísmico intermedio (en comparación con el límite de cinco pisos que proponen para el caso en que se utilicen muros delgados, reforzados con barras dúctiles).

Blandon et al. (2018) observaron un comportamiento similar e indicaron que el principal mecanismo de fallo fue la ruptura del acero, especialmente en los muros con refuerzo del alma, constituido por mallas de alambre electrosoldadas con respecto a los muros reforzados con barras de acero moderadamente dúctiles.

Influencia de los traslapes

La transferencia de fuerzas entre barras de refuerzo que se empalman se basa sobre todo en un mecanismo esencialmente frágil, dado por la unión entre el concreto y el acero, debido a que, en ausencia de refuerzo de confinamiento transversal, la fuerza de unión deben resistirla en su totalidad los esfuerzos de tracción del concreto que actúan perpendicularmente al plano del traslape (Moehle, 2015).

En la práctica convencional de construcción del sistema industrializado, por facilidad constructiva es común dejar embebidas en la cimentación barras verticales cortas de acero convencional como refuerzo de arranque, las cuales se empalman después con las mallas de alambre electrosoldado u otras barras (Blandón & Bonett, 2020; Vélez, 2020). Esto significa que

el refuerzo del elemento arranca en el nivel superior de la fundación, donde los esfuerzos y deformaciones son mayores.

En las investigaciones analíticas y numéricas de J. P. Almeida et al. (2017) y Tarquini et al. (2017), se encontró que los parámetros que más inciden en la ductilidad de un elemento con empalmes por traslazo son la falta de refuerzo de confinamiento, la longitud del traslazo, el historial de la carga y el gradiente de momento. La longitud del traslazo suele beneficiar la transferencia de esfuerzos entre barras; sin embargo, si no se proporciona un refuerzo de confinamiento adecuado para evitar la degradación de la fuerza de unión, la longitud del traslazo adicional que se proporcione tiene poco valor añadido, ya que la fluencia tiende a penetrar rápidamente desde algún extremo del traslazo o incluso desde ambos extremos; igualmente, de los ensayos experimentales se encontró que los empalmes por traslazo bien confinados pueden soportar más ciclos de carga; sin embargo, el confinamiento adecuado en la base del elemento suele tener un efecto negativo, debido a que puede desplazar la sección crítica donde se concentra la respuesta inelástica del elemento por encima del traslazo, reduciendo así la resistencia y ductilidad del elemento.

ASPECTOS QUE INCIDEN EN EL COMPORTAMIENTO DE MUROS DELGADOS QUE DEPENDEN DE SOLICITACIONES EXTERNAS

Influencia de la dirección de la aplicación de la carga sísmica

En los estudios numéricos y experimentales de Niroomandi (2018) y Niroomandi et al. (2021), se investiga el comportamiento sísmico de muros de CR rectangulares sometidos a diferentes patrones de carga (carga en el plano, carga inclinada con un ángulo de 45° y en forma de hoja de trébol). En los estudios se encontró que las cargas bidireccionales pueden generar primero el desprendimiento del recubrimiento de concreto, aplastamiento del concreto, pandeo o rotura de las barras longitudinales en un muro de CR, en comparación con un régimen de cargas cíclicas en el plano. Se halló también que las deformaciones unitarias de compresión y tracción fueron mayores en el muro sometido a un patrón de carga diagonal a 45° , en comparación con los otros dos patrones de carga. Ante cargas bidireccionales también se observó más vulnerabilidad a la ruptura del

acero longitudinal, en comparación con las cargas en el plano.

Adicionalmente, el patrón de carga en forma de hoja de trébol fue el más perjudicial en cuanto a la disminución de la rigidez fuera del plano del muro y, por lo tanto, el fallo por inestabilidad lateral se produjo antes, en el espécimen bajo este patrón de carga.

Rosso et al. (2020) evaluaron la inestabilidad fuera del plano ante cargas bidireccionales a través de modelación y la tendencia observada corresponde a lo observado en las investigaciones de Niroomandi (2018) y Niroomandi et al. (2021), ya que disminuyen tanto la deformación crítica de tracción como la deriva en el plano que desencadena la inestabilidad fuera del plano.

En el estudio experimental de J. Almeida et al. (2017), en el que se aplicaron cargas bidireccionales a muros en forma de “T”, se observó que cuando la carga se dirige hacia el alma (dirección negativa en el plano del muro), los desplazamientos fuera del plano a media altura son considerablemente mayores que cuando se aplica la carga del muro hacia la aleta (dirección positiva en el plano del muro). Esto se debe a que el ala es más estable a la compresión que el alma del muro.

Influencia del nivel de carga axial

Entre los estudios a los que se hace referencia en este artículo que investigaron sobre el efecto del nivel de carga axial en muros de CR, Dashti, Dhakal et al. (2020a) encontraron que los elementos sometidos a una mayor demanda de deformación por compresión fueron propensos a desarrollar desprendimiento del concreto de recubrimiento o aplastamiento del concreto en etapas más tempranas de carga, en comparación con elementos con menores demandas de compresión; y a su vez, estos fallos prematuros generaron el subsecuente desarrollo de la inestabilidad fuera del plano antes de que los muros alcanzaran la deriva de diseño cuando se sometían a cargas laterales, como se discutió con anterioridad. Lo anterior coincide con lo encontrado por Chrysanidis (2019) y Chrysanidis (2020).

Con respecto al efecto de la carga axial en la deformación fuera del plano se halló que, con cargas axiales bajas, el cierre de las fisuras durante el ciclo de carga y descarga inversa se produce más tarde en comparación con un mayor nivel de carga axial; por lo tanto, la deformación fuera del plano podría recuperarse más rápida-

mente en este último caso. Algo similar a esto también se observó en Dashti et al. (2018a). Sin embargo, una vez que el refuerzo longitudinal supera la deformación de tracción crítica, cualquier magnitud de carga axial de compresión puede resultar perjudicial al generar un momento P-delta que agudiza la deformación fuera del plano de la sección (Dashti et al., 2021).

Shegay et al. (2018) investigan también el efecto de la variación de la relación de carga axial (ALR) de baja a moderada (0,10 a 0,20) en la capacidad de deformación de muros de CR. En este estudio se encontró que el aumento de la carga axial representó físicamente un mayor daño del concreto tanto en altura como a lo largo de los muros; adicionalmente, la capacidad de deformación lateral de los muros disminuía con el aumento de la carga axial.

Finalmente, aunque la carga axial puede influir en la capacidad de deriva lateral de los muros, la variación de la ALR en rangos entre 0,0 y 0,35 no cambió en forma significativa la capacidad de deriva lateral del muro, por lo que no existe una correlación directa entre estos dos parámetros y no se recomienda establecer límites de la carga axial del muro por sí solos para obtener cierta capacidad de deriva en el muro (Abdullah & Wallace, 2019).

COMPORTAMIENTO ESPERADO DE MUROS DELGADOS

Capacidad de desplazamiento

En relación con los ensayos experimentales que evaluaron la capacidad de deriva, Ortega et al. (2021) encontraron que la capacidad de deriva que pueden alcanzar muros de CR delgados fue de aproximadamente 1,60 %; sin embargo, en el estudio de Blandon et al. (2018) se presentaron derivas inferiores al 1,43 %.

En Blandón & Bonett (2020), se halló que a medida que se aumentaban la carga axial, la longitud del muro o la relación de esbeltez, o cuando se reducía el espesor de los muros, o no había elementos de borde, la capacidad de deriva se reducía a valores como 0,70 %. Aunque los muros cortos (longitud inferior a 1,50 m), con una sola capa de refuerzo, sin elementos de confinamiento, de espesores reducidos, pudieron alcanzar derivas superiores al 1,50 %.

Es importante tener presente que para poder comparar directamente los valores de deriva obtenidos en forma experimental con los valores de deriva límite

de los reglamentos es necesario considerar el sistema estructural completo; en efecto, la deriva total de techo será mayor que la deriva medida experimentalmente.

Según Abdullah & Wallace (2019), la capacidad de deriva de los muros de CR tiene que ver en gran medida con parámetros como la relación entre la profundidad del eje neutro y el ancho del elemento de borde, c/b ; la relación entre la longitud del muro y el ancho del elemento de borde, L_w/b ; la magnitud del esfuerzo cortante del muro y la configuración del refuerzo transversal del elemento de borde (estribos cerrados de confinamiento superpuestos vs. un solo estribo cerrado de confinamiento perimetral más ganchos suplementarios, como se indicó anteriormente en la figura 1). Dependiendo de estas variables, la capacidad de deriva lateral puede ser tan baja como 1,25 % y tan alta como 3,50 %.

Por el contrario, variaciones en parámetros como la relación entre área total de refuerzo transversal dentro de elemento de borde proporcionada y requerida (Ash proporcionada/Ash requerida); s/db ; el espaciamiento máximo horizontal, medido centro a centro, entre ganchos suplementarios o ramas de estribos cerrados de confinamiento, h_x ; la ARL (en rangos entre 0 y 0,35) no demostró tener una importancia significativa o una correlación directa en la capacidad de deriva de los muros.

Degradación de rigidez

Como se mencionó al comienzo de este artículo, los muros estructurales de CR son ampliamente utilizados como sistema de resistencia sísmica debido a que, por sus dimensiones, en el análisis estructural proporcionan una rigidez considerable, que contribuye al control de desplazamientos y derivas, en comparación con los sistemas tradicionales de pórticos. No obstante, durante un movimiento sísmico intenso, se espera que los muros de CR de una edificación sufran una reducción importante de su rigidez lateral a causa de diversos factores, entre ellos la fisuración del concreto o la fluencia de los materiales.

Los análisis estructurales son muy sensibles a las suposiciones de rigidez que hace el ingeniero diseñador, por lo que generalmente se suelen imponer límites en la rigidez para obtener estimaciones conservadoras de esfuerzos, derivas de piso y distribuciones de fuerzas internas. De acuerdo con Moehle (2015), la rigidez de

los muros estructurales depende de las cuantías de refuerzo, deslizamiento del refuerzo desde la cimentación, rotación de la cimentación, fuerza axial, entre otros.

Para determinar la sensibilidad de los muros ante los cambios de rigidez, en el estudio de Cando et al. (2020) se evalúa el efecto de la rigidez en el desempeño sísmico de edificios conformados por muros de CR, a través de análisis dinámicos no lineales llevados a cabo en *software* de elementos finitos a un grupo de cuatro edificios de muros de 20 pisos (52 metros en altura total), en el que los muros tienen una relación de aspecto (H_w/L_w) mayor de 2 y cuyos parámetros geométricos, de los materiales, cargas y demás variables, se describen de manera completa en la referencia del autor.

En este estudio se halló una reducción de la resistencia a la fluencia (que se define como el punto en el cual el desplazamiento del techo de la edificación produce la primera fluencia en cualquier muro) y de la resistencia a cortante máxima que puede alcanzar un muro cuando disminuye la rigidez; así mismo, se encontró que los edificios más rígidos tienen menos probabilidades que los flexibles de alcanzar el estado límite de servicio y de prevención de colapso ante demandas sísmicas.

En el estudio de Ortega et al. (2021) se encontró que cuando se alcanzó una deriva del 0,50 % en una edificación, los muros delgados de CR perdían entre el 37 % y 53 % de su rigidez inicial; cuando se alcanzó una deriva del 1,00 %, perdían entre el 77 % y 67 % de su rigidez inicial y se daba comienzo al aplastamiento del concreto; y cuando se alcanzó el límite de deriva del 1,43% habían perdido el 82 % de su rigidez y el refuerzo del alma del muro estaba cerca de la fractura.

En el estudio hecho por Blandon et al. (2018), los autores reportan que la degradación de la rigidez también fue severa, ya que se observaron reducciones de la rigidez inicial de aproximadamente 50 %, 85 % y 90 % para niveles de deriva del 0,10 %, 0,50 % y 0,70 %, en ese orden. Finalmente, Blandón & Bonett (2020) encontraron que para una deriva del 1,00 %, los muros sufrieron una pérdida de rigidez entre el 63 % y 72 %.

En los anteriores estudios se observó que la pérdida de rigidez se manifestó principalmente por el daño concentrado en la interfaz muro - cimentación y no se distribuyó a lo largo de la altura del muro. Lo anterior indica que aunque *a priori* se presumiría que por la geometría con la que cuentan los muros brindarían grandes aportes de rigidez lateral desde el análisis, es clave tener

en cuenta el comportamiento y la degradación de rigidez que realmente van a presentar ante un evento sísmico.

Por otro lado, Ramos & Hube (2020) estudiaron el efecto de la reducción de rigidez disminuyendo los momentos de inercia en vigas, columnas, muros y losas, con los valores propuestos en el ACI 318-19 (Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario, ACI 318S-19, 2019) a través de modelos numéricos de edificaciones conformadas por muros de CR, que representan edificaciones construidas de 2005 a 2009 y que sufrieron daños durante el terremoto en Chile de 2010. Como resultado de este estudio, se halló que la rigidez de la losa ejerce una influencia importante en las demandas de carga axial, cortante y momento sísmico; la tendencia observada fue que, al considerar secciones fisuradas, se predicen menores demandas sísmicas que cuando se utilizan secciones brutas.

Por otra parte, se encontró que la rigidez de la losa ejerce también una influencia significativa en los perfiles de los diagramas de cortante y momento de las solicitaciones, hasta el punto de que hace que sean muy diferentes de los diagramas convencionales de muros en voladizo, que son los que comúnmente se asumen en los códigos de diseño como el ACI 318-19 (Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario, ACI 318S-19, 2019) y NSR-10 (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, 2010).

Los perfiles que se obtuvieron del sistema de muros acoplados con losas también difieren de los perfiles convencionales para muros acoplados a través de vigas, por lo que la suposición común de diseño para relacionar el desplazamiento del techo con la demanda de curvatura en un edificio de muros de CR puede ser inadecuada en este tipo de sistemas de muros delgados de CR (Ramos & Hube, 2020).

Efecto de acoplamiento con elementos horizontales

En el estudio de Ramos & Hube (2020), se estimó la contribución de los elementos de acoplamiento a las demandas sísmicas de carga axial, cortante y momento que se generan a lo largo de la altura de los edificios de muros de CR, y se halló que las losas tienen una contribución a la carga axial sísmica de aproximadamente más del 90 %, seguido de las vigas. Esta interacción con los elementos de acoplamiento genera grandes demandas de carga axial sísmica en los muros de CR, tanto así que

en algunos casos las ALR sísmicos pueden superar a los obtenidos a partir de las cargas muertas.

Algo similar a lo anterior se encontró en el estudio numérico de Vásquez et al. (2020), realizado mediante análisis dinámicos no lineales, modelando en *software* de elementos finitos una edificación de muros de CR, de 18 pisos y 2 sótanos, donde se evidenció un aumento significativo de la carga axial debido a los efectos dinámicos producidos por el efecto de acoplamiento de las losas, en especial cuando las luces entre apoyos eran cortas.

Finalmente, Ramos & Hube (2021) evaluaron el comportamiento sísmico de un edificio de 16 pisos (41,60 m en total), conformado por muros CR con losas como elemento de acoplamiento y el efecto generado al variar la cuantía de refuerzo de las losas, mediante análisis no lineales estáticos, usando *software* de elementos finitos.

En este estudio se encontró que, debido al efecto de acoplamiento entre muros y losas, la resistencia máxima a cortante del edificio aumenta a medida que se incrementa la cuantía de refuerzo de la losa; sin embargo, se observa que se reduce la capacidad de deriva del edificio y se aumenta la demanda de cortante en algunos muros. Adicionalmente, el incremento de la cuantía generó un aumento de la carga axial transferida a los muros y, por lo tanto, la deformación unitaria en compresión que generó el fallo se alcanzó antes en algunos muros en el modelo con mayor cuantía de refuerzo en losas.

Así mismo, el momento en la base de los muros sometidos a compresión aumentó a medida que se incrementaba la cuantía de refuerzo de la losa, por lo que esto generó también cambios en la capacidad a flexión en los muros, debido al efecto de interacción de la carga axial con el momento.

FUTURAS INVESTIGACIONES

Se recomienda hacer investigaciones sobre aspectos relacionados con temas constructivos del sistema industrializado y las implicaciones que puedan tener en su comportamiento sísmico. De igual manera, se sugiere profundizar más sobre el comportamiento de edificaciones conformadas por muros delgados de CR en zonas de amenaza sísmica baja.

CONCLUSIONES

A lo largo de este artículo se analizaron las más recientes investigaciones realizadas a muros de CR para conocer

su comportamiento sísmico esperado ante diferentes parámetros. Teniendo en cuenta estas evidencias (algunas experimentales y otras numéricas o analíticas), aplicadas a muros delgados de CR, se concluye de manera general que el efecto de cada uno de estos parámetros en la respuesta ante cargas sísmicas conduce a un cuestionamiento sobre el desempeño y la vulnerabilidad de este sistema estructural. A continuación, se presentan las conclusiones provenientes de la revisión de bibliografía sobre el efecto de las variables estudiadas en el comportamiento sísmico de muros delgados de CR:

- El uso de cuantías de refuerzo longitudinal pequeñas en el elemento de borde es deseable en comparación con cuantías de refuerzo longitudinal grandes (entiéndase por cuantías pequeñas las cercanas a las cuantías mínimas sugeridas en la bibliografía y cuantías grandes las cercanas al 4 %), por cuanto conducen a que aumente la $\epsilon_{glob,cr}$ que desencadena el fallo por inestabilidad fuera del plano; sin embargo, debe haber una cuantía de refuerzo longitudinal mínima, concentrada en los extremos del muro, para que se produzca una adecuada distribución de plasticidad, como lo han comprobado Lu et al. (2018).
- Los muros revestidos con dos capas de refuerzo requieren que una de las dos capas fluya en compresión antes de que puedan producirse grandes desplazamientos fuera del plano, y esto puede ocurrir cuando la rigidez de una capa de refuerzo se reduce debido al efecto Bauschinger o a la plastificación en compresión. De este modo, en los muros con dos capas de refuerzo, la aparición de deformaciones fuera del plano y la posterior formación de la inestabilidad requieren fuerzas de compresión más grandes, en comparación con muros de una sola capa de refuerzo.
- La cuantía de refuerzo longitudinal del alma del muro no tuvo efectos notables en el desarrollo de la inestabilidad lateral fuera del plano, por lo que el comportamiento de este fenómeno está controlado principalmente por el elemento de borde.
- El espesor de los muros de CR es uno de los aspectos más importantes en el desarrollo de la inestabilidad fuera del plano, pero resulta más benéfico implementar secciones de muros con mayor espesor. El espesor contribuye a mejorar el comportamiento porque permite el uso de mayores espesores de concreto de

recubrimiento que aumentan la restricción contra el pandeo de las barras longitudinales, facilita el proceso constructivo en cuanto a la adecuada colocación del refuerzo, contribuye a la disposición apropiada de elementos de borde que confinen adecuadamente el concreto, entre otros.

- Al aumentar la altura del libre del muro y la rotación de los elementos que le brindan apoyo se incrementa la posibilidad de que se produzca inestabilidad lateral fuera del plano; igualmente, las condiciones de borde de los apoyos del muro inciden en la altura involucrada en la inestabilidad fuera del plano.
- La longitud del muro también incide en el desarrollo de la inestabilidad fuera del plano. Los muros más largos desarrollan mayores deformaciones de tracción en el acero de refuerzo longitudinal y, por lo tanto, son más propensos al pandeo.
- El uso de concretos con mejores capacidades a compresión retrasa el inicio de fallos localizados, como desprendimiento del concreto de recubrimiento o aplastamiento; debido a esto, los muros con concretos de menor resistencia a la compresión son más susceptibles de sufrir inestabilidad lateral fuera del plano.
- El nivel de carga axial en un muro tiene un efecto similar al anterior, debido a que los elementos con mayores demandas de compresión son más susceptibles de sufrir desprendimiento del concreto de recubrimiento o aplastamiento del concreto en etapas más tempranas de carga, por lo que inducen modos de fallas locales en el elemento; así mismo, los elementos sometidos a flexocompresión, con cargas axiales que exceden el punto balanceado, son propensos a desarrollar fallas frágiles que disminuyen la capacidad de deformación lateral del elemento.
- Aunque se evidenció que hay muchas variables que inciden directamente en el pandeo lateral, como la carga axial, longitud del muro, cuantía de refuerzo longitudinal, cuantía del elemento de borde, resistencia a la compresión del concreto, altura libre del muro, condiciones de borde de los apoyos, disposición del refuerzo longitudinal, cargas fuera del plano, algunas de estas pueden ser más controlables que otras por el ingeniero diseñador desde el punto de vista práctico del diseño, como la relación de esbeltez, disposición del refuerzo y cuantía de refuerzo del elemento de borde; por el contrario, hay otras

variables sobre las cuales no se puede ejercer tanto control desde el diseño, como por ejemplo la altura libre y las condiciones de apoyo. Así, se sugiere abordar parámetros como el espesor detallado del refuerzo para controlar la inestabilidad fuera del plano.

- Los muros en los que el refuerzo se encuentra conformado por estas mallas de alambre electrosoldado de baja ductilidad presentan menores capacidades de disipación de energía. Este aspecto cobra mayor importancia para el comportamiento sísmico en edificaciones ubicadas en zonas de amenaza sísmica alta e intermedia, donde se requieren grandes capacidades de ductilidad en los elementos.
- El efecto de acoplamiento de muros de CR con otros elementos, como losas o vigas, genera en los muros un aumento de las demandas de carga axial, cortante y momento producidas por efectos sísmicos, siendo mayores cuando se incrementa la cuantía de refuerzo y rigidez del elemento de acoplamiento.
- La capacidad de deriva de muros de CR tiene una relación directa con parámetros como la relación entre la profundidad del eje neutro y el ancho del elemento de borde, c/b ; la relación entre la longitud del muro y el ancho del elemento de borde, L_w/b ; la magnitud del esfuerzo cortante último del muro y la configuración del refuerzo transversal del elemento de borde.

REFERENCIAS

- Abdullah, S., & Wallace, J. (2019). Drift Capacity of RC Structural Walls with Special Boundary Elements. *ACI Structural Journal*, 116, 183–194. <https://doi.org/10.14359/51710864>
- Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario (2019). ACI 318S-19.
- Alarcon, C., Hube, M. A., & De la Llera, J. C. (2014). Effect of axial loads in the seismic behavior of reinforced concrete walls with unconfined wall boundaries. *Engineering Structures*, 73, 13–23. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.047>
- Almeida, J. P., Prodan, O., Tarquini, D., & Beyer, K. (2017). Influence of lap splices on the deformation capacity of RC walls. I: Database assembly, recent experimental data, and findings for model development. *Journal of Structural Engineering*, 143(12), 04017156.
- Almeida, J., Prodan, O., Rosso, A., & Beyer, K. (2017). Tests on Thin Reinforced Concrete Walls Subjected to In-Plane and Out-of-Plane Cyclic Loading. *Earthquake Spectra*, 33(1), 323–345. <https://doi.org/10.1193/101915eqs154dp>
- Arroyo, O., Feliciano, D., Carrillo, J., & Hube, M. A. (2021). Seismic performance of mid-rise thin concrete wall buildings lightly reinforced with deformed bars or welded wire mesh. *Engineering Structures*, 241(March), 112455. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112455>
- Arteta, C. A., Blandón, C., Bonett, R., & Carrillo, J. (2018). Estudio del comportamiento sísmico de edificios de muros delgados de

- Concreto Reforzado. CEER (Colombian Earthquake Engineering Research Network), 002–2017.
- Blandón, C. A., Arteta, C. A., Bonett, R. L., Carrillo, J., Beyer, K., & Almeida, J. P. (2018). Response of thin lightly-reinforced concrete walls under cyclic loading. *Engineering Structures*, 176(July), 175–187. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.089>.
- Blandón, C., & Bonett, R. (2020). Thin slender concrete rectangular walls in moderate seismic regions with a single reinforcement layer. *Journal of Building Engineering*, 28(July 2019). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101035>.
- Bonett, R., Carrillo, J., Blandón, C., Zapata, A., & Arteta, C. (2022). Characterization of the thin lightly-reinforced concrete wall (TLRCW) buildings in Colombia. Under preparation.
- Cando, M. A., Hube, M. A., Parra, P. F., & Arteta, C. A. (2020). Effect of stiffness on the seismic performance of code-conforming reinforced concrete shear wall buildings. *Engineering Structures*, 219, 110724. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110724>.
- Carrillo, J., Prado, N., & Domínguez, D. (2017). Damage Index Based on Fractal Dimension of Cracking on Thin Reinforced Concrete Walls. *ACI Structural Journal*, 114(1), 1649–1658. <https://doi.org/10.14359/51700919>.
- Chai, Y. H., & Elayer, D. T. (1999). Lateral stability of reinforced concrete columns under axial reversed cyclic tension and compression. *Structural Journal*, 96(5), 780–790.
- Chrysanidis, T. (2019). Influence of elongation degree on transverse buckling of confined boundary regions of R/C seismic walls. *Construction and Building Materials*, 211, 703–720. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.271>.
- Chrysanidis, T. (2020). Evaluation of Out-of-Plane Response of R/C Structural Wall Boundary Edges Detailed with Maximum Code-Prescribed Longitudinal Reinforcement Ratio. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0378-4>.
- Chrysanidis, T. (2021). The effect of longitudinal reinforcement ratio on the lateral buckling behavior of R/C walls modelled using prism elements. *Journal of Building Engineering*, 42, 102456. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102456>.
- Constantin, R.-T. (2016). Seismic behaviour and analysis of U-shaped RC walls [École Polytechnique Fédérale de Lausanne]. <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-7133>.
- Dashti, F., Dhakal, R. P., & Pampanin, S. (2018a). Blind prediction of in-plane and out-of-plane responses for a thin singly reinforced concrete flanged wall specimen. *Bulletin of Earthquake Engineering* (ol. 16, issue 1). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0211-x>.
- Dashti, F., Dhakal, R. P., & Pampanin, S. (2018b). Evolution of out-of-plane deformation and subsequent instability in rectangular RC walls under in-plane cyclic loading: Experimental observation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 47(15), 2944–2964. <https://doi.org/10.1002/eqe.3115>
- Dashti, F., Dhakal, R. P., & Pampanin, S. (2020a). A parametric study on out-of-plane instability of doubly reinforced structural walls. Part I: FEM predictions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(8), 3747–3780. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00828-w>
- Dashti, F., Dhakal, R. P., & Pampanin, S. (2020b). Out-of-Plane Response of In-Plane-Loaded Ductile Structural Walls: State-of-the-Art and Classification of the Observed Mechanisms. *Journal of Earthquake Engineering*, 1–22. <https://doi.org/10.1080/13632469.2020.1713928>
- Dashti, F., Dhakal, R., & Pampanin, S. (2021). Design recommendations to prevent global out-of-plane instability of rectangular reinforced concrete ductile walls. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 54(3), 211–227. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.54.3.211-227>.
- Dashti, F., Tripathi, M., Dhakal, R. P., & Pampanin, S. (2020). A parametric study on out-of-plane instability of doubly reinforced structural walls. Part II: Experimental investigation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(11), 5193–5220. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00898-w>.
- Hoult, R., Appelle, A., Almeida, J., & Beyer, K. (2020). Seismic performance of slender RC U-shaped walls with a single-layer of reinforcement. *Engineering Structures*, 225(January), 111257. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111257>.
- Hoult, R. D. (2019). Shear Lag Effects in Reinforced Concrete C-Shaped Walls. *Journal of Structural Engineering*, 145(3), 04018270. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002272](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002272).
- Hoult, R. D., & Beyer, K. (2020). Decay of Torsional Stiffness in RC U-Shaped Walls. *Journal of Structural Engineering*, 146(9), 04020176. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002733](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002733).
- Hoult, R. D., Goldsworthy, H. M., & Lumantarna, E. (2018). Plastic hinge analysis for lightly reinforced and unconfined concrete structural walls. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(10), 4825–4860. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0369-x>.
- Hoult, R., Goldsworthy, H., & Lumantarna, E. (2018). Plastic Hinge Length for Lightly Reinforced Rectangular Concrete Walls. *Journal of Earthquake Engineering*, 22(8), 1447–1478. <https://doi.org/10.1080/13632469.2017.1286619>.
- Hoult, R., Goldsworthy, H. M., & Lumantarna, E. (2020). Plastic Hinge Length for Lightly Reinforced C-Shaped Concrete Walls. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(7), 1083–1114. <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1453419>.
- Lu, Y., Gultom, R., Ma, Q., & Henry, R. (2018). Experimental Validation of Minimum Vertical Reinforcement Requirements for Ductile Concrete Walls. *ACI Structural Journal*, 115. <https://doi.org/10.14359/51702048>.
- Moehle, J. P. (2015). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071839440>.
- Moreno, O. A., & Uribe, A. A. (2002). *Construcción de viviendas de interés social en el municipio de Donmatías*. Escuela de Ingeniería de Antioquia.
- Moscoco, J. F., Hube, M. A., & Santa María, H. (2021). Residual Seismic Capacity of Reinforced Concrete Walls with Unconfined Boundaries. *ACI Structural Journal*, 118(5), 205–220. <https://doi.org/10.14359/51732830>.
- Niroomandi, A. (2018). Seismic behaviour of rectangular reinforced concrete walls under bi-directional loading [University of Canterbury]. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.26021/3211>.
- Niroomandi, A., Pampanin, S., Dhakal, R. P., Ashtiani, M. S., & Nokes, R. (2021). Experimental study on the effects of bi-directional loading pattern on rectangular reinforced concrete walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(7), 2010–2030. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/eqe.3433>.
- Ortega, R., Naranjo, C., Torres, P., Madera, C., & Marulanda, J. (2021). Evaluation and fitting of a numerical model for reinforced concrete thin walls through experimental results of monotonic and cyclic loading tests. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 18(5), 1–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/1679-78256575>.
- Parra, P. F., & Moehle, J. P. (2017). Stability of slender wall boundaries subjected to earthquake loading. *ACI Structural Journal*, 114(6), 1627–1636. <https://doi.org/10.14359/516851700836>
- Paulay, T., & Priestley, M. J. N. (1993). Stability of ductile structural walls. *Structural Journal*, 90(4), 385–392.

- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement-based seismic design of structures*. IUSS Press: Distributed by Fondazione Eucentre.
- Ramos, L., & Hube, M. (2020). Contribution of coupling elements to the seismic demand of walls in reinforced concrete buildings. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 17. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/1679-78255931>.
- Ramos, L., & Hube, M. A. (2021). Seismic response of reinforced concrete wall buildings with nonlinear coupling slabs. *Engineering Structures*, 234, 111888. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111888>.
- Rosso, A., Almeida, J. P., & Beyer, K. (2015). Stability of thin reinforced concrete walls under cyclic loads: state-of-the-art and new experimental findings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(2), 455–484. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9827-x>.
- Rosso, A., Jiménez-Roa, L. A., Almeida, J. P. de, & Beyer, K. (2020). Instability of Thin Concrete Walls with a Single Layer of Reinforcement under Cyclic Loading: Numerical Simulation and Improved Equivalent Boundary Element Model for Assessment. *Journal of Earthquake Engineering*, 00(00), 1–32. <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1691679>.
- Rosso, A., Jiménez-Roa, L. A., De Almeida, J. P., Zuniga, A. P. G., Blandón, C. A., Bonett, R. L., & Beyer, K. (2018). Cyclic tensile-compressive tests on thin concrete boundary elements with a single layer of reinforcement prone to out-of-plane instability. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(2), 859–887. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0228-1>.
- Shegay, A., Dashti, F., Hogan, L., Lu, Y., Niroomandi, A., Seifi, P., Zhang, T., Dhakal, R., Elwood, K., Henry, R., & Pampanin, S. (2020). Research programme on seismic performance of reinforced concrete walls: Key recommendations. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 53(2), 54–69. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.53.2.54-69>.
- Shegay, A. v, Motter, C. J., Elwood, K. J., & Henry, R. S. (2019). Deformation Capacity Limits for Reinforced Concrete Walls. *Earthquake Spectra*, 35(3), 1189–1212. <https://doi.org/10.1193/080118EQS193M>.
- Shegay, A. v, Motter, C. J., Elwood, K. J., Henry, R. S., Lehman, D. E., & Lowes, L. N. (2018). Impact of axial load on the seismic response of rectangular walls. *Journal of Structural Engineering*, 144(8), 04018124. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002122](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002122).
- Sritharan, S., Beyer, K., Henry, R. S., Chai, Y. H., Kowalsky, M., & Bull, D. (2014). Understanding Poor Seismic Performance of Concrete Walls and Design Implications. *Earthquake Spectra*, 30(1), 307–334. <https://doi.org/10.1193/021713EQS036M>.
- Tarquini, D., Almeida, J. P., & Beyer, K. (2017). Influence of lap splices on the deformation capacity of RC walls. II: Shell element simulation and equivalent uniaxial model. *Journal of Structural Engineering*, 143(12), 04017157.
- Tripathi, M., & Dhakal, R. (2021). Designing and detailing transverse reinforcement to control bar buckling in rectangular RC walls. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 54(3), 228–242. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.54.3.228-242>.
- Tripathi, M., Dhakal, R. P., & Dashti, F. (2020). Nonlinear cyclic behaviour of high-strength ductile RC walls: Experimental and numerical investigations. *Engineering Structures*, 222, 111116. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111116>.
- Tripathi, M., Dhakal, R. P., Dashti, F., & Gokhale, R. (2020). Axial response of rectangular RC prisms representing the boundary elements of ductile concrete walls. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(9), 4387–4420. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00868-2>.
- Vásquez, J. A., Jünemann, R., de la Llera, J. C., Hube, M. A., & Chacón, M. F. (2020). Three-dimensional nonlinear response history analyses for earthquake damage assessment: A reinforced concrete wall building case study. *Earthquake Spectra*, 37(1), 235–261. <https://doi.org/10.1177/8755293020944180>.
- Vélez, J. (2020). *Estudio numérico y experimental sobre el comportamiento sísmico de muros delgados de edificios de concreto reforzado*. Universidad de Antioquia.
- Vélez, J. C., Blandón, C. A., Bonett, R., Arteta, C., Carrillo, J., Almeida, J. P., & Beyer, K. (2017). *Ensayos cuasiestáticos cíclicos de muros delgados de concreto reforzado en edificios colombianos*. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 1–7.
- Wallace, J. W., Massone, L. M., Bonelli, P., Dragovich, J., Lagos, R., Lüders, C., & Moehle, J. (2012). Damage and Implications for Seismic Design of RC Structural Wall Buildings. *Earthquake Spectra*, 28(1\suppl1), 281–299. <https://doi.org/10.1193/1.4000047>.
- Wight, J. K., & MacGregor, J. G. (2016). *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*, eBook, Global Edition. Pearson Education. <https://books.google.com.co/books?id=8rbeDAAAQBAJ>.

APÉNDICE

Los siguientes símbolos se utilizaron en este artículo:

ALR = relación de carga axial.

Ash = área total de refuerzo transversal (incluyendo ganchos suplementarios) dentro del elemento de borde del muro.

b = ancho de la zona en compresión del muro (elemento de borde).

c = distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el eje neutro.

CR = concreto reforzado.

db = diámetro de las barras de refuerzo longitudinal.

f'c = esfuerzo resistente máximo a compresión del concreto.

fy = esfuerzo de fluencia del acero longitudinal.

H = altura libre del muro sin arriostrar, que generalmente corresponde a la altura de libre de entrepiso.

Hw = altura total del muro hasta el nivel del techo.

hx = espaciamiento máximo horizontal, medido centro a centro, entre ganchos suplementarios o ramas de estribos cerrados de confinamiento.

Lw = longitud del muro.

s = separación del refuerzo transversal de cortante.

ec = deformación unitaria por compresión en el concreto.

$\epsilon_{glob, cr}$ = deformación unitaria a tracción crítica que desencadena la inestabilidad fuera del plano.

ρ_{BE} = cuantía de refuerzo longitudinal del elemento de borde.

ρ_w = cuantía de refuerzo longitudinal del muro.

Análisis de género en el transporte en Bogotá: factores que influyen en el uso del transporte público por parte de las mujeres

Gender analysis in Bogotá public transportation: Factors that influence public transportation use by women

PAULA VALENTINA PERDOMO BOTELLO¹ - MÓNICA MÁRCELA SUÁREZ PRADILLA²

1. Magíster en Ingeniería Civil.

2. Doctora en Gestión y Valoración Urbana, profesora asistente del programa de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

paula.perdomo@mail.escuelaing.edu.co - monica.suares@escuelaing.edu.co

Recibido: 21/09/2021 Aceptado: 30/10/2021

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

Es fundamental que la planificación del transporte público incluya entre sus lineamientos el enfoque de género, para dar importancia a las experiencias de las mujeres en la toma de decisiones y entender cómo los roles de género afectan el derecho al uso y disfrute de la ciudad. En los proyectos orientados al transporte no se abordan, por lo general, las diferencias de género, y como consecuencia de esto se ignoran las necesidades específicas de las mujeres en cuanto a sus desplazamientos. El objetivo principal de esta investigación es identificar los factores que pueden ser determinantes en la elección modal de transporte público para las mujeres en la ciudad de Bogotá. Por tal razón, se calibra un modelo lineal generalizado tipo Logit, para evaluar la elección modal de transporte público de las mujeres utilizando características socioeconómicas y variables relacionadas con el viaje realizado. Se utilizaron datos de la Encuesta de Movilidad de Bogotá 2019, de la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM).

Los resultados muestran que las mujeres se mueven más que los hombres en modos sostenibles como la caminata y el transporte público. Además, los factores socioeconómicos (como el estrato y los ingresos) cumplen un papel crucial en la explicación de la elección modal de las

mujeres. Finalmente, se demostró que la probabilidad de usar transporte público es más elevada en mujeres jóvenes (entre 18 y 29 años), a medida que aumenta la distancia del viaje; y, por el contrario, esta probabilidad disminuye cuando el tiempo de caminata hacia el paradero/estación es muy alto y el entorno construido no es atractivo.

Estos hallazgos son interesantes de cara a la formulación de políticas públicas de equidad que fomenten el transporte sostenible y la inclusión de género.

Palabras claves: movilidad, transporte público, patrones de viaje, género.

Abstract

It is fundamental for public transport planning to include a gender perspective in its guidelines, to give importance to women's experiences in decision-making and to understand how gender roles affect the right to use and enjoy the city. Transportation-oriented projects usually do not address gender differences, and as a result, women's specific travel needs are ignored.

The main objective of this research is to identify the factors that may be determinant in the modal choice of public transport for women in

the city of Bogotá. Therefore, a Logit-type generalized linear model is calibrated to evaluate women's modal choice of public transport using socioeconomic characteristics and variables related to the trip made. Data from the Bogota Mobility Survey 2019 of the District Secretary of Mobility (SDM in Spanish) were used.

The results show that women, compared to men, move more in sustainable modes such as walking and public transport. In addition, socioeconomic factors - such as stratum and income - play a crucial role in explaining women's modal choice. Finally, it was shown that the probability of using public transport is higher in young women (aged 18-29 years) as the distance of the trip increases. On the contrary, this probability decreases when the walking time to the stop/station is very high, and the built environment is not attractive. These findings are interesting for the formulation of public equity policies that promote sustainable transport and gender inclusion.

Keywords: mobility, public transportation, travel patterns, gender.

INTRODUCCIÓN

En general, se cree que la movilidad y los diseños de los sistemas de transporte no discriminan respecto al género, es decir, que benefician a todos por igual. Sin embargo, los hombres y las mujeres tienen distintos roles y responsabilidades socioeconómicas que están relacionados con diferentes necesidades, patrones de acceso y uso del transporte (Granada et al., 2016). Así, los viajes de los hombres suelen ser pendulares, mientras que los de las mujeres son más poligonales con varias paradas antes de llegar a su destino final.

En América Latina, la calidad de los servicios de transporte público no es suficiente para brindar una movilidad eficiente y segura; de hecho, los propios servicios de transporte reflejan y acentúan las desigualdades existentes entre mujeres y hombres (Pérez, 2019). Particularmente en Colombia, la consideración del género como principio transversal en la planificación del transporte público urbano es casi nula; aún no se han implementado metodologías de recolección y análisis de información enfocadas en el género, lo que implica que se desconozca el comportamiento de los patrones de movilidad de las mujeres en el transporte público. Sumado a esto, con frecuencia se hace referencia a Colombia como uno de los países más desiguales y peligrosos para las mujeres en el mundo, lo que podría intensificar la brecha de género (Moscoso et al., 2020).

En los proyectos orientados al transporte y a la movilidad no se abordan habitualmente las diferencias entre los viajes de mujeres y hombres en las áreas urbanas, y los datos desglosados por género sobre las necesidades y patrones de viaje son muy limitados. Así,

se desconocen las necesidades de las mujeres en cuanto a sus desplazamientos (mayoritariamente multipropósito, con varias paradas para realizar distintas tareas) y se ha convertido en una limitante para que las mujeres accedan a oportunidades económicas, sociales y culturales, disminuyendo su productividad e impactando su calidad de vida (Miralles-Guasch et al., 2015).

La movilidad es un factor determinante para la calidad de vida de todas las personas. La planificación y la gestión de los servicios asociados a la infraestructura del transporte tienen como objetivo conectar a la gente por medio de la mitigación de los índices de segregación socioespacial, acercando las zonas residenciales, económicas y productivas que ofrecen los territorios (Montoya et al., 2021). La planificación tiene el reto de considerar una perspectiva diferencial de género en la movilidad urbana, lo que implica hacer el cambio hacia un sistema de transporte público que contemple los motivos por los que se mueven las personas y sus horarios de viaje. El uso del género como categoría de análisis hace que las mujeres sean visibles no solo como sujetos de planificación, sino también como participantes activas en los procesos de planificación y formulación de políticas (Jaimurzina et al., 2017).

CASO DE ESTUDIO: BOGOTÁ

La ciudad de Bogotá tiene una extensión de 1775 km² y un total de 8,38 millones de habitantes, de los cuales 52 % corresponden a mujeres y 48 % a hombres, distribuidos entre 20 localidades urbanas y rurales, según los datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2020). El sistema de transporte público de Bogotá está configurado por un sistema de transporte público masivo BRT conocido como TransMilenio (buses troncales y TransMiCable), Sistema Integrado de Transporte Público (SITP), buses de transporte colectivo y buses intermunicipales.

El Análisis del comportamiento de los viajes por género de la Encuesta de movilidad 2019 (Unión Temporal Steel y Centro Nacional de Consultoría [CNC], 2019) muestra que, en Bogotá, las distribuciones modales de los viajes de hombres y mujeres no son las mismas. Las mujeres se mueven más en modos sostenibles, el 68 % de sus viajes los hacen a pie y en transporte público, mientras que el 52 % de los viajes de los hombres se hacen en estos modos (figura 1).

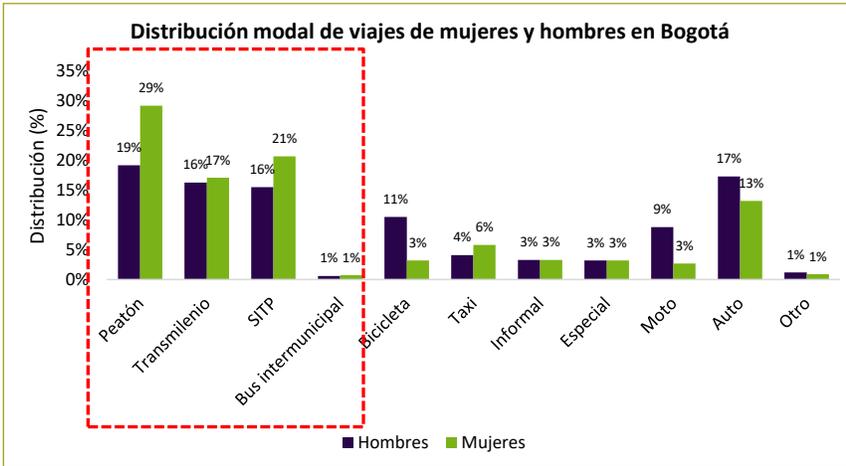


Figura 1. Distribución modal de viajes por género en Bogotá.

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos de la Encuesta de Movilidad 2019 de Bogotá.

Según la Encuesta de Percepción Ciudadana 2017, hecha por Bogotá Cómo Vamos (2017), el 62 % de las mujeres en Bogotá considera que el sistema TransMilenio empeoró en el último año porque bajó la calidad del servicio y no se sienten seguras al usarlo. La percepción de las mujeres frente al sistema de transporte público refleja la necesidad de un enfoque diferencial en su planificación, considerando los patrones de movilidad y las experiencias de los usuarios.

Es de vital importancia que entre los lineamientos de la planificación del transporte público se incluya el enfoque de género, con el fin de darles importancia a las experiencias de las mujeres en la toma de decisiones y de entender cómo los roles de género afectan el derecho que ellas tienen al uso y disfrute de la ciudad. Por eso, en este trabajo de investigación se sugiere una metodología de análisis enfocada en género en el transporte en Bogotá, que ayude a entender cómo son los patrones de viaje en el transporte público, cuáles factores influyen en su uso, y a su vez, identificar las

herramientas necesarias para ofrecer una infraestructura y servicios de transporte que satisfagan las necesidades de todos los usuarios.

Análisis del comportamiento de los viajes por género de la Encuesta de movilidad 2019

Al analizar la duración del viaje por motivo de trabajo por estrato, se observa que las mujeres de ingresos muy bajos (estratos 1 y 2) gastan más tiempo en sus desplazamientos que los hombres en el mismo nivel socioeconómico (figura 2). Además, las mujeres en estrato 1 se demoran casi el doble de tiempo desplazándose que las mujeres de estrato 6. Esto puede deberse a que una mayor proporción de las mujeres en estrato 1 utiliza transporte público y a las largas distancias que deben recorrer pues, sus viviendas tienden a estar ubicadas en la periferia de la ciudad, donde la accesibilidad al sistema de transporte no es muy buena y las rutas de transporte público no suelen planificarse para conectar los lugares

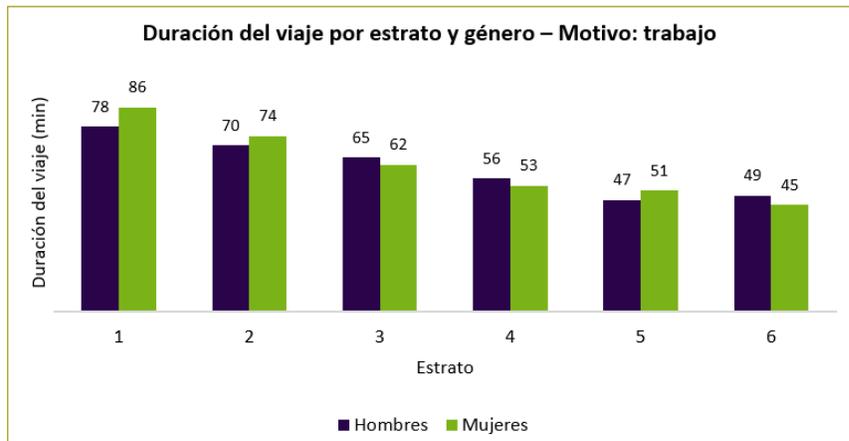


Figura 2. Duración del viaje por estrato y género en Bogotá. Motivo: trabajo.

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos de la Encuesta de Movilidad 2019 de Bogotá.

de vivienda con los centros de empleo formal (Moscoso et al., 2020). Esto también hace que incluso las mujeres tengan que pagar más para llegar a su destino final, y que utilicen transporte informal.

Las mujeres jefas de hogar tienen una menor proporción de viajes con motivo de trabajo que sus pares hombres, y una mayor proporción de viajes de cuidado (figura 3). Esto refleja el rol triple de las mujeres en el hogar, pues no solo deben hacer trabajo productivo, sino también de cuidados comunitarios, mientras que, en el caso de los hombres jefes de hogar, el trabajo de cuidado lo asume casi exclusivamente la mujer.

Estos resultados son el reflejo de la falta de consideración del género como principio transversal en la planificación del transporte público. Aún no se han implementado metodologías de recolección y análisis de información enfocadas en género, lo que implica que se desconozcan los patrones de movilidad de las mujeres, específicamente en el transporte público.

DATOS Y METODOLOGÍA

Las variables explicativas consideradas en el análisis de las tendencias de la elección modal de transporte público en las mujeres en Bogotá incluyen las características socioeconómicas de la persona y del hogar, al igual que factores relacionados con el viaje realizado, como el motivo y la distancia de viaje. Los datos se han recolectado del Análisis del comportamiento de los viajes por género de la Encuesta de movilidad 2019, que proporciona información detallada de una muestra de 70.843 viajes hechos por mujeres.

De acuerdo con la revisión de la bibliografía existente, se eligió un modelo Logit binomial de respuesta dicotómica que permite analizar diferentes individuos, así como utilizar una gran variedad de características socioeconómicas, el cual se ajusta bastante bien a los datos de la elección modal del transporte público de las mujeres. Además, se hizo la prueba estadística de Hosmer y Lemeshow para evaluar la calibración del modelo, la cual arroja qué tan bien se ajustan los datos al modelo, y solo se usa para variables de respuesta binaria.

RESULTADOS

Muchas variables socioeconómicas resultaron estadísticamente significativas a la hora de explicar el uso del transporte público por parte de las mujeres en Bogotá. Por ejemplo, si la edad de la mujer se encuentra entre 0 y 17 años, la probabilidad de usar el transporte público disminuye en un 70 % en comparación con el caso base (edad de más de 60 años); por el contrario, si la edad de la mujer está entre 18 y 29, 30 y 44 y 45 y 59 años, el uso del transporte público aumenta en un 88 %, 31 % y 46 %, respectivamente.

Así mismo, se observa que a mayor nivel de ingresos el uso de transporte público en las mujeres disminuye comparado con el caso base (ingresos entre \$0 y \$828.116), 39 % para ingresos entre \$3.500.000 en adelante; para los ingresos entre \$828.116 y \$3.500.000, la elección modal de transporte público aumenta en un 33 %.

Algo similar ocurre según el estrato socioeconómico, si la mujer es de estrato bajo (1 y 2), el empleo del

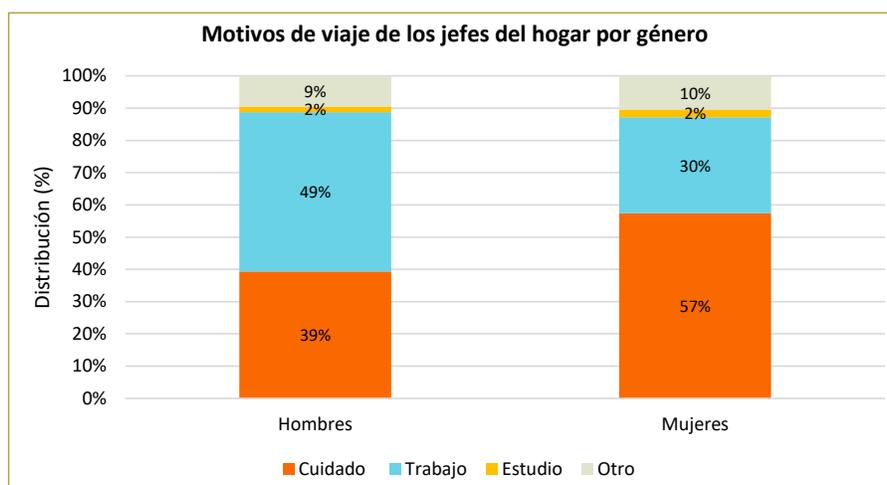


Figura 3. Motivos de viaje de los jefes del hogar por género.

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos del Análisis del comportamiento de los viajes por género de la Encuesta de movilidad 2019.

Atributo	Variables	Coef.		
Características socioeconómicas	EDAD	0 - 17 años	-1,197 ***	
	Ref (≥ 60 años)	18 - 29 años	0,632 ***	
		30 - 44 años	0,270 ***	
		45 - 59 años	0,378 ***	
		INGRESOS	\$828.116-\$2.000.000	0,130 ***
	Ref. (0 - \$828.116)	\$2.000.000-\$3.500.000	0,172 ***	
		\$3.500.000-\$6.800.000	-0,078 *	
		Más de \$6.800.000	-0,373 ***	
	ESTRATO	Bajo	0,258 ***	
		Ref. (Medio)	Alto	-0,378 ***
Variables relacionadas con tenencia de vehículo y economía	Tiene carro		-0,457 ***	
	Tiene moto		-0,268 ***	
	Tiene bicicleta		-0,110 ***	
	TIENE CARRO	Estrato bajo	0,159 ***	
		Ref. (estrato medio)	Estrato alto	-0,295 ***
	TIENE MOTO	Estrato bajo	0,020	
		Ref. (estrato medio)	Estrato alto	0,242 *
	TIENE BICICLETA	Estrato bajo	-0,141 ***	
		Ref. (estrato medio)	Estrato alto	-0,151 *
	Características del viaje	Tiempo de caminata en minutos		-0,018 ***
PROPÓSITO DE VIAJE		Asuntos de trabajo	0,670 ***	
		Ref. (volver a casa)	Estudiar	0,462 ***
		Buscar trabajo	1,269 ***	
		Ocio y recreación	-0,441 ***	
		Movilidad de cuidado	-0,752 ***	
Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1				
Null deviance: 82296 on 67831 degrees of freedom				
Residual deviance: 73756 on 67805 degrees of freedom				
AIC: 73810				

transporte público aumenta en un 29 % respecto al caso base (estratos medios 3 y 4), pero si es de estrato alto (5 y 6) disminuye en un 31 %.

Las variables relacionadas con la tenencia de un vehículo también explicaron, en forma estadísticamente significativa, la elección modal del transporte público. El hecho de contar con algún vehículo (bicicleta, motocicleta o automóvil) en el hogar tiene una influencia negativa y estadísticamente significativa en el uso del transporte público en las mujeres. Si la mujer tiene carro en su hogar y es de estrato bajo, el empleo del transporte público aumenta en un 52 %, pero si es de estrato alto

este porcentaje disminuye en un 49 %. En el caso en que la mujer tiene una motocicleta en el hogar y es de estrato alto, la elección modal del transporte público aumenta en un 27 %. Finalmente, si la mujer tiene una bicicleta en su hogar y es de estrato bajo o alto, el uso del transporte público disminuye en 13 % y 14 %, en ese orden.

Los atributos relacionados con las características del viaje también tienen grandes implicaciones en las decisiones sobre la elección modal en las mujeres. El tiempo de caminata en minutos para llegar a la parada del bus o la estación del TransMilenio tiene una influen-

cia negativa y estadísticamente significativa en el uso del transporte público.

Finalmente, en lo relacionado con el propósito de viaje, si este es para resolver asuntos de trabajo o de estudio y buscar trabajo, el uso del transporte público aumenta en un 96 %, 59 % y 31 % respecto al escenario base (propósito de volver a casa), mientras que si el viaje se hace por ocio y recreación o movilidad de cuidado, la probabilidad disminuye en 36 % y 53 %, en ese orden.

CONCLUSIONES

La revisión bibliográfica permitió comprobar que existen diferencias significativas en la movilidad de mujeres y hombres que están influenciadas por los roles de género tradicionales que se refuerzan en el espacio urbano. Aunque se sabe que hay diferencias, en los sistemas de movilidad en la mayoría de las ciudades no se ha incorporado de manera consistente una perspectiva de género que responda a las necesidades de todos sus usuarios, específicamente de las mujeres.

En Bogotá, las mujeres se mueven más en transporte público, el 39 % de sus viajes lo hacen en este modo, mientras que en los hombres este porcentaje corresponde al 33 %. Las responsabilidades domésticas y las labores de cuidado continúan siendo uno de los motivos de mayor peso en la movilidad femenina, independientemente de su situación económica, educativa o laboral. Ellas realizan más viajes de cuidado que los hombres en su misma situación, lo que implica que estas cargas domésticas aumenten las brechas de género.

Mediante la estimación de un modelo tipo Logit, en este estudio se explora cómo influyen algunos factores asociados a las características socioeconómicas de la persona, tales como la tenencia de un vehículo privado y las características del viaje en la elección modal del transporte público en las mujeres en la ciudad de Bogotá. Se encontró que las mujeres con edades entre 18 y 29 años tienen más probabilidad de usar el transporte público, y que la situación económica influye bastante en la elección del transporte público, pues las mujeres de estratos e ingresos bajos tienen más probabilidad de usar este modo de transporte frente a las mujeres de estratos e ingresos altos. Igualmente, el hecho de poseer algún vehículo particular (automóvil o motocicleta) tiene una

influencia negativa y estadísticamente significativa en el empleo del transporte público.

Estos resultados son de gran ayuda para la formulación de políticas públicas de equidad que fomenten el uso de modos de transporte sostenibles. Es importante que se reconozcan las experiencias específicas de cada género en las fases de planificación y diseño de los sistemas de transporte para hacer un transporte más inclusivo, basándose en las necesidades de las mujeres, y así tener un impacto positivo en los viajes realizados por ellas en transporte público, especialmente viajes hechos por aquellas que viven en zonas de bajos ingresos.

REFERENCIAS

- Allen, H., Cárdenas, G., Pereyra, L., Sagaris, L. (2018). *Ella se mueve segura (ESMS). Un estudio sobre la seguridad personal de las mujeres y el transporte público en tres ciudades de América Latina*. Caracas: CAF y FIA Foundation. Recuperado de <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/1405>.
- Bogotá Cómo Vamos (2017). *Ciudad y mujer*. Recuperado de <https://bit.ly/3b7LtOm>.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2020). *Proyecciones de población municipales por área 2005-2020*. Recuperado de http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/ProyeccionMunicipios2005_2020.xls.
- Granada, I., Urban, A., Monje Silva, A., Ortiz, P., Pérez, D., Montes, L. y Caldo, A. (2016). *El porqué de la relación entre género y transporte*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- Jaimurzina, A., Muñoz Fernández, C. y Pérez, G. (2017). *Género y transporte: experiencias y visiones de política pública en América Latina*. Unidad de Servicios de Infraestructura, División de Recursos Naturales e Infraestructura de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal). Recuperado de <https://bit.ly/39TaDTt>.
- Miralles-Guasch, C., Martínez Melo, M. y Marquet, O. (2015). A gender analysis of everyday mobility in urban and rural territories: from challenges to sustainability. *Gender, Place & Culture*, 23(3), 398-417.
- Montoya, V., Montes, L., Bernal, V., Camos, G., Bertossi, F., Orozco, A. M., Aristide, E., Roldán, J. D., Ángel, S., Lozano, D. y Pinilla, P. (2021). *ABC: género y transporte*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Ministerio de Transporte de Colombia. Recuperado de: <https://bit.ly/3LNqf84>.
- oscoco, M., López, J. S., Montoya Robledo, V., Quiñones Sánchez, L. M., Gómez, L. D., Lleras, N., Adriazola-Steil, C. y Vega, J. (2020). *Mujeres y transporte en Bogotá: las cuentas*. Bogotá: Despacio & WRI. Recuperado de www.despacio.org/hacemos.
- Pérez, G. (2019). Políticas de movilidad y consideraciones de género en América Latina. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal). *Comercio Internacional*, N.º 152 (LC/TS.2019/108), Santiago.
- Unión Temporal Steer y Centro Nacional de Consultoría (2019). *Caracterización de la movilidad. Encuesta de Movilidad de Bogotá 2019*. Secretaría Distrital de Movilidad (SDM).

El conocimiento y nosotros: entre el ahora y el antes

Knowledge and us: Then and now

JOSÉ CAMILO VÁSQUEZ CARO

Director del Departamento de Humanidades e Idiomas de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

jose.vasquez@escuelaing.edu.co

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Pensar el pasado implica pensar el presente. Nuestra mirada y nuestra lectura de otros tiempos evocan elementos del ahora y del contexto desde donde nos enunciamos. Cómo leemos e interpretamos el pasado revela mucho de cómo nos leemos e interpretamos a nosotros mismos hoy. Pensar nuestro lugar de enunciación nos recuerda que nuestro ahora también será un pasado relativamente pronto y que contribuirá a la consolidación de otros presentes.

Tal vez ingenuamente –y hasta erróneamente– creemos que nuestro presente ha superado el pasado, pero no nos damos cuenta de que este lugar del ahora es tan solo un lugar más en un mar infinito de tiempos que ocurren. Quizás el avance del tiempo no vaya necesariamente de la mano de un progreso y desarrollo, siendo esta una creencia y a su vez una construcción histórica que nos ha permeado a todos. Hasta cierto punto, somos hijos de la modernidad y de la mentalidad decimonónica europea de progreso. Esta condición media nuestra relación con el conocimiento y cómo actuamos a partir de esta.

Mi intención en este texto es explorar algunos momentos históricos que forjaron formas de concebir el conocimiento y su propósito para poder explicar el mundo y dar cuenta de él. Estas formas de aproximarnos al conocimiento ordenaron y jerarquizaron diferentes sociedades en diversos momentos. Nuestra relación con el conocimiento siempre ha existido. Sin embargo, la relación es cambiante y dinámica, y esto tiene consecuencias sobre las relaciones humanas y el mundo material.

Cabe anotar que lo que propongo acá es una mirada y una posible interpretación entre muchas. Lo que hago es destacar posibles conexiones entre puntos y coordenadas del pasado para entender y explicar un poco mi propio lugar de enunciación desde este presente. De ninguna forma busco afirmar una verdad o lectura única. Mi mirada claramente tendrá un sesgo, pues mi formación es en historia y busco articular el pasado con el presente. Pero no intento hacer un relato histórico del conocimiento y, por lo tanto, no considero esta reflexión un trabajo propio de la disciplina de la historia.

Me interesa resaltar que la relación o las relaciones que tenemos hoy con el conocimiento son producto de dinámicas del pasado, que a su vez tienen que ver con diversas interpretaciones y concepciones del conocimiento como tal, que son orgánicas y van cambiando. Pensar el conocimiento es pensar el ser humano en el tiempo. Para este ejercicio, es fundamental pensar de forma interdisciplinaria. Lo digo de manera tajante: el conocimiento no es propiedad exclusiva de ninguna disciplina y, a su vez, aporta a todas. Quiero invitar a romper el dominio de una disciplina en el momento de hacer esta reflexión en torno al conocimiento y nuestra relación con este.

Al pensar el conocimiento de forma interdisciplinaria, es evidente que hay muchos campos que se entrelazan. Por ejemplo, las humanidades, la ciencia y la tecnología están muy interconectadas, pese a que hoy en día tendemos a verlas como áreas independientes y casi ajenas. Esta fragmentación o alienación de saberes no es universal ni es una constante en la historia del conocimiento.

En este recorrido, me interesa conectar el pasado y el presente. Busco moverme como un péndulo entre momentos del pasado y el ahora. Empezaré por una reflexión de lo más reciente e iré sumergiéndome en diversos pasados para terminar en tiempos más remotos. Iré desde la modernidad hacia el medioevo y luego al mundo antiguo. Por último, intentaré volver a este presente.

El mundo contemporáneo y global está cargado de herencias y valores de la modernidad. Desde los siglos XVIII y XIX, los avances en las ciencias y el razonamiento eurocéntrico han impulsado un orden en el planeta en el que el dominio del conocimiento y de la tecnología permite un manejo y control sobre las variables que son determinantes para un funcionamiento adecuado en un sistema creado por estos. En cierto sentido, la cultura misma está permeada y orientada por estas directrices. La cultura es parte del sistema, se alimenta de él y, a su vez, lo alimenta.

Nuestro sistema actual vincula conocimiento, tecnología, producción y consumo, y crea imaginarios, valores y narrativas que lo legitiman y reproducen. Esto hace de lo cultural un elemento fundamental para la comprensión de este sistema y para su operación. Este es un sistema totalizante pues integra y amarra a los actores y agentes involucrados. En pocas palabras, ahí

estamos todos, porque creemos en dichas narrativas e imaginarios que impulsa el mismo sistema para mantenerse y crecer.

Los últimos siglos nos han inculcado nociones de progreso y desarrollo que estructuran y jerarquizan el mundo basado en el dominio de la ciencia, el manejo de la tecnología y la integración de estas dos variables en sistemas de producción y consumo. Las capacidades de producción y consumo han ido de la mano de estos avances. Nuestras capacidades para producir y para consumir permean nuestra vida de una forma profunda y a su vez cotidiana. Esto se logra a través de la cultura y el consumo, ya que son parte de estas lógicas y se manifiestan en los imaginarios y narrativas individuales y colectivas. En este tipo de sistema, el pensamiento crítico puede llegar a ser un campo que desconcierta y cuestiona al propio sistema y lo puede hasta modificar. Y es precisamente ahí donde radica su valor. Irónicamente, el sistema muchas veces absorbe la diferencia o la disidencia y lo incorpora en su lógica.

No es noticia que el conocimiento se ha fragmentado y especializado desde el siglo XIX. Como consecuencia, las fronteras en muchos campos del conocimiento se empujan y quiebran de modo permanente. Cada vez sabemos más y más, y paradójicamente nos damos cuenta de que cada vez sabemos menos porque los horizontes se expanden. Esta fragmentación tiene innumerables aspectos positivos, pero también tiene un lado negativo. La fragmentación nos enfoca en algo particular y, a su vez, nos aleja de lo general. Las nociones generales también son útiles y permiten una comprensión de algo mayor. Pensar lo general y lo interdisciplinario tiene un gran valor también.

Un rasgo constante de este mundo contemporáneo, orientado por lo tecnológico y lo científico, es la velocidad en que cambian las dinámicas, se rompen paradigmas y se establecen nuevos órdenes. ¿De qué forma lo hacemos? ¿Es una fragmentación cada vez mayor? ¿Nos cuestionamos un orden mayor o sencillamente caemos en una reproducción propia del sistema y garantizamos su subsistencia? De nuevo, preguntas orientadas desde otras disciplinas pueden incomodar y, a su vez, abrir espacios de debate y de reformulación.

La modernidad puso al ser humano como actor principal en el mundo. El ser moderno cree que con su razón lo puede todo. En la modernidad, se consolidan en un proceso la explicación, la capacidad de actuar y el potencial para modificar. Este coctel de posibilidades

convierte al ser humano en un agente supremamente poderoso en el planeta y las órdenes que se establecen en la Tierra. Este lugar privilegiado de la razón, acompañado de la materialización de ideas y proyectos, ha permitido que se establezcan sistemas de producción y de consumo que han determinado nuestra relación con el entorno. He aquí una tarea monumental que tenemos por delante. Debemos cuestionar nuestra relación con el entorno y pensar nuestros futuros. El resultado de esta indagación es fundamental y no le pertenece a un solo campo o a una sola área.

En el mundo occidental, antes de la modernidad, la jerarquización y el orden del mundo se daban a partir de la relación entre el conocimiento y la religión. Si en el mundo moderno, orientado hacia un progreso, se encontraba un dinamismo acentuado y veloz, en un mundo medieval se encontraban otro ritmo y otra velocidad. El conocimiento mediado por la fe es muy diferente al conocimiento mediado por la razón. El medioevo manifestó la relación tensa entre creencia y conocimiento. La razón estaba presente, pero operaba con premisas atadas al sistema de creencias religiosas. En algunos casos, la creencia daba las bases para el conocimiento; en otros, como en el retorno de Aristóteles a los pénsums de las universidades, el conocimiento impulsaba la reforma en los sistemas de creencias. La religión y el conocimiento tienen una relación, la cual forjó durante siglos una forma de vida y de orden. En el contexto medieval, tener una respuesta y una mirada determinante y única permitió unificar y mantener el orden.

Por último, me remonto a una especie de mito histórico. Al mencionar a Tales de Mileto caigo en una paradoja, pues él es una figura controversial e importante que buscó explicar y dar cuenta del mundo a través de la razón y la observación. Digo que es una paradoja porque, al hacer esto, él en sí se convierte en una figura mítica del pensamiento occidental. Tales de Mileto cuestionó desde la razón y la observación. Sus respuestas, entonces, provenían de su experiencia y razonamiento en este mundo material, de modo que su método rompió con la tradición del mito como explicación de lo que desbordaba al ser humano y lo material. Aclaro: el mito no es irracional, pero sí exige un salto de fe para aceptar su explicación.

Los presocráticos, estos filósofos naturales, buscaban respuestas a todas las preguntas que se les ocurrían. ¿Qué? ¿Cómo? ¿Por qué? Estas preguntas los impulsaban a saciar su sed por dar cuenta de los fenómenos del mundo que los rodeaba. En este sentido, buscaban un conocimiento general y universal que les brindara explicaciones que permitieran un entendimiento del mundo. Y es acá donde creo que es valioso mirar hacia atrás y ver que, antes de la especialización y la fragmentación, existió y existe una inquietud por entender un todo.

Vuelvo a mi punto de partida. Creo que no hemos superado del todo el pasado. Muchos seguimos operando bajo mitos, como los contemporáneos de Tales. Tal vez ya no haya tantos mitos para explicar el mundo material, pero si hay mitos que gobiernan nuestro



actuar y nuestra vida. Por ejemplo, muchos operamos bajo el mito del éxito, una industrial cultural en sí y un discurso mucho más poderoso que un ejército. También seguimos la lógica de la modernidad, bajo mitos como el progreso y el desarrollo.

Somos hijos de la modernidad y, a su vez, herederos del medioevo y el mundo antiguo. Pensar el pasado es pensar nuestro ahora. Para empezar a entendernos a nosotros mismos debemos mirarnos desde varias perspectivas, utilizando herramientas de diversos campos de forma interdisciplinaria, para poder dar cuenta del conjunto que somos.

La existencia humana, su relación con el conocimiento, con el entorno y entre nosotros mismos, es siempre una coyuntura compleja que amerita ser pensada, cuestionada y dialogada a través de un concierto de voces. En nuestro pensar está también nuestro actuar.

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Alcance y política

El objetivo de la *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* es difundir artículos técnicos que contribuyan al desarrollo del país a través de una publicación con alta calidad editorial y rigor científico.

La revista acepta prioritariamente los siguientes tipos de trabajos, que le permiten mantener su categorización:

1. **Artículo de investigación científica y tecnológica.** Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
2. **Artículo de reflexión.** Documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
3. **Artículo de revisión.** Documento producto de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica.

También admite artículos de las siguientes tipologías:

4. **Artículo corto.** Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requieren una pronta difusión.
5. **Reporte de caso.** Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular, con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico.
6. **Revisión de tema.** Documento resultado de la revisión crítica de la bibliografía sobre un tema en particular.

Cabe destacar que se privilegian para la revista los tipos de artículos de los numerales 1, 2 y 3.

La revista circula trimestralmente y recibe sólo artículos inéditos. Los trabajos recibidos se someten al concepto de pares académicos y del Consejo Editorial.

Requisitos para la publicación de artículos

Los artículos presentados a la revista deben remitirse por correo electrónico a revista@escuelaing.edu.co, adjuntando los siguientes formatos debidamente diligenciados: autor.doc, clasificación.doc y tipo.doc, cuyos archivos se pueden descargar de <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>. En este mismo sitio está disponible la plantilla guía que contiene la estructura determinada por la revista para los artículos.

Scope and policy

Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería disseminates technology articles helping to our country development. It emphasises on its high quality print and its scientific rigour. Articles submitted for publication shall be classified into one of the following categories— which allow it keeps its indexation:

1. **Scientific and technological research article.** These documents offer a detailed description about the original findings of research projects. In general, the usually used structure contains four important sections: introduction, methodology, results and conclusions.
2. **Reflection article.** These documents present the results of a research project on a specific, interpretative, or critical view by the author about a particular topic by using original sources.
3. **Review.** A document resulting from a finished research, where the published and/or unpublished findings of investigation in a particular field of science or technology are analysed, systematised and integrated to report the progress and the development tendencies. These documents include a careful bibliographic review.

Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería also accepts the following types of articles:

4. **Short article.** A brief text presenting the original, preliminary and/or partial results of a scientific or technological study, which normally need to be disseminated as quickly as possible.
5. **Case report.** A document that presents the results of a study on a specific situation in order to report the technical and methodological experiences considered in a particular case.
6. **Thematic review.** These documents are the product of a critical review of literature on a particular topic.

Our revista privilege articles as the highlight ones in numbers 1, 2 and 3.

Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería is a quarterly publication that only accepts unpublished articles. The revista submits all the papers to the verdict of two academic peers, who evaluate the article.

Ruling for publication

The article must be sent by e-mail to revista@escuelaing.edu.co with 3 files attached: Author.doc, Classification.doc and Type.doc available in <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>. There is also a template guide for the structure of the article (template guide.doc).



Confía en 4-72,
el servicio de envíos
de Colombia

Línea de atención al cliente:
(57 - 1) 472 2000 en Bogotá
01 8000 111 210 a nivel Nacional

.....

www.4-72.com.co