

- ***Título***

Análisis del impacto de la dinámica de crecimiento urbano de una gran ciudad en el ciclo hidrológico y el régimen de crecidas en la cuenca del río Bogotá.

- ***Resumen***

Según el Fondo de Población de Naciones Unidas, más de la mitad de la población del mundo vivirá en zonas urbanas en el 2008, actualmente se estima que en Latinoamérica el 80% de la población vive en las ciudades, este record lo alcanza Colombia a mediados del siglo XX debido en gran medida, a las problemáticas sociales que obligaron a la población rural a migrar a las cabeceras urbanas iniciando un éxodo que persiste actualmente.

Latinoamérica posee varias megalópolis, tales como Ciudad de México, Buenos Aires, Sao Paulo, que de acuerdo a los estudios demográficos tienden a absorber las pequeñas ciudades que conforman su área metropolitana, Lima y Bogotá entre otras ciudades están muy cerca de alcanzar esta categoría de acuerdo a su comportamiento histórico de expansión. (Aguilár and Ward, 2003)

La expansión urbana en Bogotá ha aumentado sobre la región en las conurbaciones anexas, al sur en los municipios de Soacha, Funza y Mosquera en los cuales se ha producido una expansión no regulada o ilegal en algunos sectores. La tendencia actual del crecimiento urbano se localiza en el norte de la ciudad en municipios como Chía y Cota, con un desarrollo urbano menos denso que en la mayor parte de la ciudad.

La ciudad de Bogotá ha tenido un crecimiento urbano progresivo desde la década de los 50 en donde el censo nacional reportó 648.424 habitantes que representaban el 5.6% de la población, según las proyecciones del censo de 2005, para el 2020 la cuenca tendrá una población de más de 10 millones de habitantes, equivalente al 20% de la población total del país, con un 97% de población urbana concentrada en la ciudad de Bogotá con más de 8 millones de habitantes. Actualmente el perímetro urbano en la cuenca es de 42.200 hectáreas, y tiene una densidad poblacional en las zonas urbanas de 200hab/has, cifras que seguirán creciendo en los próximos años. (Planeación, 2010) (CAR, 2006).

Históricamente los centros urbanos se han desarrollado en las riveras de los ríos debido a la capacidad de estos para abastecer de agua y transporte, pero el acelerado aumento de los centros urbanos ha generado grandes cargas a los sistemas naturales que tienen una limitada capacidad de resiliencia. La ciudad de Bogotá no ha sido la excepción a este comportamiento y ha ejercido gran presión sobre el río, a tal punto de considerarse actualmente como uno de los más contaminados en Latinoamérica, lo que ha ocasionado además de los impactos ambientales esperados, un incremento de los riesgos naturales sobre todo en lo relacionado con las inundaciones y un importante costo económico para la ciudad dedicado a su recuperación. (CAR, 2012)

Uno de los mayores impactos ocasionados por los asentamientos humanos en las cuencas hidrográficas están relacionados con la impermeabilización de amplias zonas a causa de la urbanización, muchos estudios han demostrado la alteración en el ciclo hidrológico, relacionados entre otros con la disminución de capacidad para infiltrar la precipitación y como consecuencia el aumento de la escorrentía y la disminución de la recarga de acuíferos y por ende la disminución en los flujos base.(Putnam, 1972),(Klein, 1979), (Sauer et al., 1983) (Booth, 1991), (Rhoads, 1995) (Hsu et al., 2000),(Smakhtin, 2001), (Shuster et al., 2005)

Este trabajo de investigación pretende analizar en detalle los diferentes tipos de superficies impermeables en la cuenca del río Bogotá y la afectación que esta área en expansión provoca al ciclo hidrológico en la cuenca. Para esta investigación se usará el modelo hidrológico TETIS.

- ***Antecedentes y Estado Actual***

Desde hace varias décadas los investigadores han identificado e inventariado ampliamente los impactos causados por la alteración de los drenajes naturales, ya sea por los usos agrícolas o emplazamientos humanos, que han generado cambios importantes relacionados con la alteración de los cursos de agua para su almacenamiento, contaminación puntual de las fuentes, alteración de la dinámica fluvial, entre otros,(Chu et al., 2013) Estos cambios de alguna manera se han contemplado, pero algunas otras afectaciones que se han derivado de dichas modificaciones y han traído consecuencias significativas que en principios no se habían tenido en cuenta; como las inundaciones, erosión, deslizamientos, destrucción de hábitat acuáticos, pérdida de filtración para la recarga de acuíferos, reducción de áreas de llanuras de inundación etc; (Shuster et al., 2005) sin duda los drenajes que se encuentran en zonas urbanas son sometidos a una mayor presión y en consecuencia sufren las repercusiones de mayor impacto, dado que en algunos casos han ocasionado importantes pérdidas humanas y materiales. (Leopold, 1973), (Hammer, 1972), (Nanson and Young, 1981)(Booth, 1991), (O'Driscoll et al., 2010)

Las zonas impermeables en las cuencas se han definido como aéreas creadas por la acción humana que restringen el movimiento del agua desde la superficie hasta el suelo, como construcciones, vías, estacionamientos y otras infraestructuras cubiertas por asfalto u otro tipo de materiales, o simplemente compactadas (superficies semi endurecidas).

La metodología propuesta por la *Autoridad del suministro de agua de New Jersey*, sugiere que el principal problema está relacionado con la densidad de la cubierta impermeable en la cuenca, El porcentaje de área impermeable total (%TIA) se expresa como una porción de la superficie total de la cuenca, pero no tienen en cuenta aquellas áreas permeables que circundan las zonas impermeables. (Alley and Veenhuis, 1983) (Authority, 2000), (Shuster et al., 2005)

En algunos modelos hidrológicos se identifican las zonas urbanas como zonas totalmente impermeables, pero recientes investigaciones plantean la posibilidad de un incremento exagerado del porcentaje estimado de zonas impermeables en la cuenca. (Aichele and Andresen, 2013). Los principales problemas de usar las áreas impermeable totales (TIA) en los modelos hidrológicos, están relacionados con la sobre estimación de volúmenes de escorrentía

|

y caudales máximos, al igual que los parámetros de infiltración, también pueden ser subestimados los cambios en la simulación de la escorrentía causada por la intensidad del uso del suelo. (Alley and Veenhuis, 1983).

Dada la incapacidad del área total impermeable (TIA) de representar correctamente las áreas impermeables en la cuenca, los investigadores sugiere el termino (%EIA) porcentaje de área impermeable eficaz o efectiva, en la cual no se consideran de la misma manera las áreas permeable que rodean las zonas impermeable, ya que estas tendrían un menor impacto. (Alley and Veenhuis, 1983) (Authority, 2000), (Shuster et al., 2005)

Algunas zonas consideradas en principio como permeables (césped, pavimentos permeables y algunos otros tipos de cobertura que poseen diferentes tipos de infiltración, pueden comportarse como impermeables cuando las tasas de filtración son más bajas que las de precipitación y generar escorrentía con el exceso de agua en su superficie, por tanto se consideran con un nivel dinámico de permeabilidad variable dependiente de la cantidad, duración e intensidad de las lluvias. (Shuster et al., 2005).

Las calles son estructuras urbanas que no solo concentran el flujo, si no que aumentan su velocidad, Adicionalmente los canales, zanjas, bordillos, alcantarillado se interconectan para formar una estructura que ayuda a las vías como medios de transporte generando los respectivos impactos sobre las inundaciones, cuando su capacidad es sobrepasada. (Harr et al., 1975), (Sauer et al., 1983), (Harned, 1988), (Jones and Grant, 1996), (Shuster et al., 2005)

La precisión en la identificación de los diferentes tipos de superficies impermeable tiene importantes implicaciones a la hora de predecir los impactos sobre la hidrología, algunos autores han realizados clasificaciones para diferentes niveles de precisión, sin embargo en función de la heterogeneidad en el uso del suelo de las zonas urbanas, se pueden presentar serias complicaciones para su correcta clasificación. (Lee and Heaney, 2003)

La caracterización, evaluación y mapeo de los diferentes tipos de cubiertas impermeables ya se ha descrito en algunas metodologías como las publicadas por la *Autoridad del suministro de agua de New Jersey 2000*, en las que se usan diferentes técnicas para el cálculo, del (%TIA) y (%EIA), con diversos niveles de complejidad, esfuerzo y costo. (Authority, 2000). Sin embargo la integración de los SIG y la teledetección a las metodologías de evaluación clasificación y seguimiento de los diferentes tipos de cubiertas impermeables, supone la disminución en costos y mayor calidad de resultados, en la medida en la que las fuentes de datos disponibles sean fiables y accesibles.

La mayor parte de los estudios sobre los impactos de la impermeabilización de las cuencas se ha realizado en ciudades de no más de 5.5 millones de habitantes. (Aichele and Andresen, 2013) (Chu et al., 2013) (Trudeau and Richardson, 2015) En este trabajo se realizara un análisis de la evolución de zonas urbanas en la cuenca del Río Bogotá que cuenta con más de 8 millones de habitantes y que actualmente se está expandiendo hacia su área metropolitana, con proyecciones de crecimiento a cinco años que sobrepasan los 10 millones.

Para el desarrollo de esta investigación se identificara una sub cuenca piloto, con un área cercana a los 20 km², que describa el comportamiento típico del desarrollo urbano en la cuenca en las últimas décadas y mediante herramientas SIG y fotografías aéreas o satelitales, se realizara un análisis muti- temporal de la evolución de estas zonas urbanas.

Esta información pretende identificar diferentes categorías de impermeabilización que posteriormente se incluirán en el modelo hidrológico TETIS, con el fin de modelar la subcuenca usando datos de alta resolución espacial (5mts). Posteriormente se usara una escala más grosera (100 mts) de la misma zona para repetir el proceso de modelación.

Con el análisis de los resultados obtenidos usando las dos escalas para la misma zona, se propondrán algunos ajustes al modelo TETIS, para posteriormente modelar la cuenca completa del río Bogotá.

- **HIPOTESIS**

Frente aumento de la densificación urbana en la cuenca del río Bogotá, surge la necesidad de preguntarse. ¿En qué medida se ha ido afectando al ciclo hidrológico en la cuenca en las últimas décadas y cómo ha afectado este a la modificación de los regímenes de crecidas que ocasionan las inundaciones?

- **OBJETIVOS**

Objetivo General

Identificar las alteraciones al ciclo hidrológico, causadas por el incremento y densificación urbana en la cuenca del Río Bogotá.

Objetivos específicos

- Identificación de la dinámica urbana en las últimas décadas, en una sub cuenca de la cuenca del Río Bogotá, mediante las tecnologías SIG
- Aplicar el modelo hidrológico TETIS a la subcuenca urbana con resolución espacial de 5 metros.
- Aplicar el modelo hidrológico TETIS a la cuenca urbana con resolución espacial de 100 metros.
- Analizar los resultados obtenidos y proponer ajustes al modelo TETIS.
- Aplicar el modelo TETIS modificado a la Cuenca del Río Bogotá.

- **Metodología a Utilizar**

El trabajo de investigación se realizara en tres etapas.

En la primera etapa se identificara una sub-cuenca dentro de la cuenca del río Bogotá, con un área no mayor a 20 kilómetros cuadrados, un porcentaje de zona urbana superior al 10% del área de la cuenca y en la medida de lo posible con una estación de aforo.

Se realizará el análisis multi-temporal de la dinámica de crecimiento urbano en las últimas décadas

Esta cuenca se modelara con TETIS, usando los datos a resolución espacial de 5 y posteriormente a 100 metros.

Se realizará un artículo sobre el análisis de cambios en el uso del suelo urbano.

|

En la segunda etapa de este trabajo se analizarán los resultados y se propondrán los ajustes al modelo y se realizará un artículo con los resultados del análisis.

En la etapa final se modelará toda la cuenca del río Bogotá a una resolución espacial de 100 a 200 mts, dependiendo de la capacidad de procesamiento de la que se disponga, se usará el modelo Hidrológico TETIS modificado, se analizarán los resultados para identificar las posibles alteraciones del ciclo hidrológico de la cuenca del río Bogotá y se realizará un artículo con los resultados obtenidos.

- ***Medios a Utilizar***

Información:

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se requieren los datos meteorológicos históricos y la cartografía básicas, fotografías, aéreas, imágenes de satélite y demás información espacial histórica de la cuenca que permita cartografiar su evolución.

Equipos: Hardware y software

Será necesario un equipo de cómputo con los recursos suficientes para procesar los datos y en cuanto a los programas se requerirán el Modelo TETIS y otros programas desarrollados por el grupo de investigación, además de un software para sistemas de información geográfica.

- ***Planificación temporal y utilidad de la Investigación***

A continuación se describen las actividades propuestas en el diagrama de Gantt:

1. *Revisión del estado del arte y definición de objetivos:*

Esta actividad se realizará durante todo el periodo de investigación.

2. *Realización de asignaturas transversales:*

Como parte de los requisitos del programa de doctorado se deben realizar algunas asignaturas transversales que ofrece la escuela de doctorados y que hacen parte de los créditos necesarios para optar al título de doctorado.

3. *Elaboración de propuesta de investigación:*

A partir de una revisión inicial del estado del arte y como resultado de las discusiones con el director se elaborará un documento que contendrá las principales etapas de la Investigación y el tiempo durante el que se desarrollarán.

4. *Selección de área de estudio:*

Este trabajo de investigación se realizará sobre la cuenca del Río Bogotá, sin embargo inicialmente se seleccionará una sub-cuenca urbana.

5. *Análisis multitemporal de cambios de usos del suelo urbano*

|

En la Sub-cuenca urbana seleccionada se realizará el análisis del cambio en el uso de suelo urbano en las últimas décadas a escala detallada.

6. Divulgación de resultados:

Con el resultado obtenido de la evolución de la expansión urbana en la sub-cuenca, se escribirá un artículo para su publicación en una revista científica o congreso.

7. Modelado de sub-cuenca en TETIS con datos 5 mts:

Los resultados obtenidos de la evolución urbana para la sub-cuenca, se incluirán en la modelación hidrológica, con el modelo TETIS, usando un tamaño de pixel de 5 metros.

8. Modelado de sub-cuenca en TETIS con datos 100 mts:

Se realizará una generalización de la información de la sub-cuenca y se realizará nuevamente la modelación con resolución espacial de los datos a 100 mts.

9. Análisis y comparación de resultados:

Después de obtener los resultados de los dos modelos antes descritos se analizarán, con el fin de proponer algunas modificaciones al modelo.

10. Divulgación de resultados:

Con el resultado obtenido en la comparación de los modelos se pretende escribir un artículo para su publicación en una revista científica.

11. Modelado de la cuenca usando TETIS modificado:

Cuando se tengan los ajustes propuestos del modelo Hidrológico TETIS, se modelarán los datos para la cuenca del Río Bogotá.

12. Análisis de resultados:

En esta etapa se realizará el análisis de los resultados obtenidos en la cuenca y se identificarán las posibles alteraciones al ciclo hidrológico, ocasionadas por la expansión urbana de la Megalópolis de Bogotá.

13. Divulgación de resultados:

Con el resultado obtenido en este análisis final se elaborará un artículo para su publicación en una revista científica.

• **bibliografía**

- Aguilár, A.G., Ward, P.M., 2003. Globalization, regional development, and mega-city expansion in Latin America: Analyzing Mexico City's peri-urban hinterland. *Cities* 20, 3–21. doi:10.1016/S0264-2751(02)00092-6
- Aichele, S.S., Andresen, J. a., 2013. Spatial and temporal variations in land development and impervious surface creation in Oakland County, Michigan, 1945-2005. *J. Hydrol.* 485, 96–102. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.12.049
- Alley, W.M., Veenhuis, J.E., 1983. Effective Impervious Area in Urban Runoff Modeling. *J. Hydraul. Eng.* 109, 313–319. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:2(313)
- Authority, N.J. water S., 2000. IMPERVIOUS SURFACE METHODOLOGY A Methodology for Defining and Assessing Impervious Surfaces in the Raritan River Basin. New Jersey.
- Booth, D.B., 1991. Urbanization and the Natural Drainage System.pdf (application/pdf Object). *Northwest environmental J.* 7, 93–118.
- CAR, 2012. Adecuación hidráulica y recuperación ambiental del Río Bogotá.
- CAR, 2006. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá. Resumen Ejecutivo. Bogotá.
- Chu, M.L., Knouft, J.H., Ghulam, a., Guzman, J. a., Pan, Z., 2013. Impacts of urbanization on river flow frequency: A controlled experimental modeling-based evaluation approach. *J. Hydrol.* 495, 1–12. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.04.051
- Hammer, T.R., 1972. Stream channel enlargement Due to Urbanization, in: *Water Resources Research*. pp. 1530– 1540.
- Harned, A.D., 1988. Effects of Highway Runoff on Streamflow and Water Quality in the Sevenmile Creek Basin , a Rural Area in the Piedmont Province of North Carolina , July 1981 to July 1982 United States Geological Survey Paper 2329. Denver.
- Harr, R.D., Harper, W.C., Krygier, J.T., Hsieh, F.S., 1975. Changes in storm hydrographs after road building and clear-cutting in the Oregon Coast Range. *Water Resour. Res.* doi:10.1029/WR011i003p00436
- Hsu, M.H., Chen, S.H., Chang, T.J., 2000. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system. *J. Hydrol.* 234, 21–37. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00237-7
- Jones, J. a, Grant, G.E., 1996. Peak flow responses to clear cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon. *Water Resour. Res.* 32, 959–974.
- Klein, R.D., 1979. Urbanizationand Stream Quality Impairment. *Water Resour. Bull.* 15, 948–963. doi:10.1111/j.1752-1688.1979.tb01074.x

- Lee, J.G., Heaney, J.P., 2003. Estimation of Urban Imperviousness and its Impacts on Storm Water Systems. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 129, 419–426. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:5(419)
- Leopold, L.B., 1973. River Channel Change with Time: An Example. *Geol. Soc. Am. Bull.* 84, 1845–1860. doi:10.1130/0016-7606(1973)84<1845:RCCWTA>2.0.CO;2
- Nanson, G.C., Young, R.W., 1981. Downstream reduction of rural channel size with contrasting urban effects in small coastal streams of southeastern Australia. *J. Hydrol.* 52, 239–255. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(81)90173-6
- O'Driscoll, M., Clinton, S., Jefferson, A., Manda, A., McMillan, S., 2010. Urbanization Effects on Watershed Hydrology and In-Stream Processes in the Southern United States. *Water* 2, 605–648. doi:10.3390/w2030605
- Planeación, S.D. de, 2010. Boletín 23 población y desarrollo urbano alcaldía mayor de bogotá. Bogotá.
- Putnam, A.L., 1972. Effect of urban development on floods in the Piedmont Province of North Carolina, Open-File Report. Raleigh, NC.
- Rhoads, B.L., 1995. Stormwater Runoff and Receiving Systems: Impact, Monitoring, and Assessment, in: *Stream Power: A Unifying Theme for Urban Fluvial Geomorphology*. pp. 65–73.
- Sauer, V.B., Thomas, W.O., Stricker, V. a., Wilson, K.V., 1983. Flood Characteristics of Urban Watersheds in the United States: United States Geological Survey Water-Supply Paper 2207 69.
- Shuster, W.D., Bonta, J., Thurston, H., Warnemuende, E., Smith, D.R., 2005. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. *Urban Water J.* 2, 263–275. doi:10.1080/15730620500386529
- Smakhtin, V.U., 2001. Low flow hydrology: a review. *J. Hydrol.* 240, 147–186. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1
- Trudeau, M.P., Richardson, M., 2015. Change in event-scale hydrologic response in two urbanizing watersheds of the Great Lakes St Lawrence Basin 1969–2010. *J. Hydrol.* 523, 650–662. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.01.069