



Análisis de la susceptibilidad por inundaciones asociadas a la dinámica fluvial del río Guatiquía en la ciudad de Villavicencio, Colombia

Sandra Dudei Varón Gutiérrez ¹ 

Germán Vargas Cuervo ² 

Resumen

Los ríos tropicales de piedemonte, por sus características sedimentológicas, hidrológicas e hidráulicas, generan cauces trenzados con múltiples canales que varían en número y dimensión en un lecho mayor, dependiendo de las condiciones climáticas. En este artículo se presenta el análisis del comportamiento morfodinámico de un río tropical de piedemonte en Colombia (río Guatiquía), como base para la evaluación de la susceptibilidad por inundaciones de una población ribereña (Villavicencio). El estudio se realiza mediante (i) el análisis de información histórica consultada en reportes técnicos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y del Servicio Geológico Colombiano; (ii) el estudio de series hidrológicas; (iii) el procesamiento e interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélites multispectrales en un periodo de 78 años; así como a través de (iv) la elaboración de la cartografía geológica y geomorfológica con controles de campo. Se determinó, por un lado, el comportamiento dinámico de los cauces trenzados dentro del límite del lecho mayor del sistema fluvial y, por otro, la susceptibilidad a las inundaciones en la ciudad de Villavicencio, con 64,7 ha en categoría media-alta y 17,9 ha en categoría alta.

Palabras clave: dinámica fluvial, geomorfología, inundación, susceptibilidad, Villavicencio.

Ideas destacadas: artículo de investigación sobre el modelamiento de amenazas por inundaciones relacionadas con la dinámica poblacional.



RECIBIDO: 26 DE FEBRERO DE 2018. | EVALUADO: 5 DE ABRIL DE 2018. | ACEPTADO: 2 DE MAYO DE 2018.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Varón Gutiérrez, Sandra Dudei, y Germán Vargas Cuervo. 2019. "Análisis de la susceptibilidad por inundaciones asociadas con la dinámica fluvial del río Guatiquía en la ciudad de Villavicencio, Colombia." *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 28 (1): 152-174. doi: 10.15446/rcdg.v28n1.70856.

1 Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, Bogotá - Colombia. ✉ sdvarong@unal.edu.co – ORCID: 0000-0001-8207-377X.

2 Universidad Nacional de Colombia, Bogotá - Colombia. ✉ gvargasc@unal.edu.co – ORCID: 0000-0003-2489-3993.

✉ Correspondencia: Sandra Dudei Varón Gutiérrez, carrera 78 A n.º 6 B 28 Int. 3 Apto 501 Bogotá, Colombia.

Analysis of Susceptibility to Flooding Associated with the Dynamics of the Guatiquia River in Villavicencio, Colombia

Abstract

Given their sedimentological, hydrological, and hydraulic characteristics, tropical piedmont rivers create braided courses interwoven with numerous channels that vary in quantity and size in a main riverbed, depending on climatic conditions. This article presents an analysis of the morphodynamical behaviour of a tropical piedmont river in Colombia (the Guatiquía river), as the basis for the evaluation of the susceptibility to flooding of a riverside city (Villavicencio). The study was carried out by (i) analysing historical information consulted in technical reports produced by the Colombian Institute of Hydrology, Meteorology, and Environmental Studies (IDEAM), the Agustín Codazzi Geographic Institute (IGAC), and the Colombian Geological Service; (ii) studying hydrological series; (iii) processing and interpreting aerial photographs and multispectral satellite images over a period of 78 years; as well as (iv) by producing the geological and geomorphological cartography with fieldwork controls and support. Thus, it was possible to determine, on the one hand, the dynamic behaviour of the braided courses within the boundaries of the main riverbed of the river system, and, on the other hand, the susceptibility to flooding of the city of Villavicencio, with 64.7 ha in the medium-high category and 17.9 ha in the high category.

Keywords: river dynamics, geomorphology, flooding, susceptibility, Villavicencio.

Análise de suscetibilidade por inundações associadas à dinâmica fluvial do rio Guatiquía, em Villavicencio, Colômbia

Resumo

Os rios tropicais de sopé, devido às suas características sedimentológicas, hidrológicas e hidráulicas, geram canais trançados com múltiplos canais que variam em número e dimensão em um leito maior, dependendo das condições climáticas. Este artigo apresenta a análise do comportamento morfodinâmico de um rio tropical de sopé na Colômbia (rio Guatiquía), como base para avaliar a suscetibilidade de inundação em uma população ribeirinha (Villavicencio). O estudo foi realizado tanto através (i) da análise de informações históricas, consultadas em relatórios técnicos do Instituto de Hidrologia, Meteorologia e Estudos Ambientais da Colômbia (IDEAM), do Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) e do Serviço Geológico Colombiano; (ii) do estudo de séries hidrológicas; (iii) do processamento e interpretação de fotografias aéreas e imagens de satélites multiespectrais, em um período de 78 anos; bem como através (iv) da elaboração da cartografia geológica e geomorfológica com controles de campo. Em primeiro lugar, foi determinado o comportamento dinâmico dos canais trançados dentro do limite do leito maior do sistema fluvial e, em segundo lugar, a suscetibilidade à inundação na cidade de Villavicencio, com 64,7 ha na categoria média-alta e 17,9 ha na categoria alta.

Palavras-chave: dinâmica fluvial, geomorfologia, inundação, suscetibilidade, Villavicencio.

Introducción

En países tropicales andinos como Colombia los sistemas fluviales se pueden dividir por sus características fisiográficas en ríos de: llanura, intramontanos de cordillera, piedemonte y litorales (Vargas Cuervo 2018). Colombia, con un sistema andino subdividido en tres cordilleras, genera una alta dinámica en sus piedemontes con sistemas fluviales de características torrenciales. Debido al transporte súbito de material desde las cuencas altas se forman abanicos aluviales, que han sido lugares estratégicos para el asentamiento de poblaciones desde la época de la colonia. Como contrapartida de la disponibilidad de recursos naturales por la permanencia de agua y suelos fértiles (Trefethen 1987), estas zonas son altamente susceptibles a inundaciones y crecientes que afectan las poblaciones ribereñas (Aguilar, Bedoya y Hermelin 2007; Flórez y Suavita Bejarano 1997).

Estudios geomorfológicos de procesos fluviales han sido abordados por múltiples autores, entre los cuales se destacan Gregory (2004), Gutiérrez Elorza (2009), Leopold, Wolman y Miller (1964) y Vargas (2009, 2012). Los métodos cuantitativos de sistemas fluviales trenzados se han enfocado principalmente en mediciones de la sinuosidad asociada con la cantidad de sedimentos en el canal o lecho mayor, de ello hacen referencia los trabajos de Brice (1960, 1964); Egozi y Ashmore (2008), Gutiérrez (2009), Jahnig, Lorenz y Hering (2008), Kiss y Sipos (2007) y Schumm (1963). En cuanto a los métodos y aplicaciones de técnicas de sensores remotos, sistemas de información geográfica y modelamiento numérico aplicados en estudios geomorfológicos de sistemas fluviales e inundaciones, hacen referencia los trabajos de Castillo-López y Vargas Cuervo (2018), Ghinassi et ál. (2016), Henshaw et ál. (2013); Hernández (2015), Olaya Ferrero (2004), Orjuela Vásquez (2015), Rodríguez et ál. (2007), Serrato Álvarez (2010), Singh (2012), Van Zuidam (1985), Vargas Cuervo (2008a, 2008b, 2015, 2016) y DANE e IGAC (2005), entre otros.

En la zona de interés, los estudios disponibles están relacionados con diagnósticos para formular planes de ordenamiento. El estudio más reciente está relacionado con la determinación del grado de vulnerabilidad definido en el Plan de Ordenamiento Territorial “Norte” de 2015. Otro estudio en la cuenca baja del río Guatiquía hace referencia al trabajo de Vargas Cuervo (1998b) y los estudios del Ministerio de Minas y energía junto con Ingeominas (2003).

Área de estudio

El área de estudio se concentra en la parte baja de la cuenca del río Guatiquía, en el piedemonte llanero, en el flanco oriental de la cordillera Oriental, al noroccidente del departamento del Meta, a la altura de la cabecera municipal de Villavicencio. Delimitada por las siguientes coordenadas en el sistema Magna Sirgas Colombia, origen Bogotá: 1045748,49-956535,18; 1058539,05-947970,54; 1058539,05-956535,18; 1045748,49-947970,54 (figura 1). La ciudad de Villavicencio se localiza en el margen derecho del río Guatiquía en el piedemonte de la cordillera Oriental, a una altura de 467 m.s.n.m., con una temperatura media anual de 27 °C y 4.260 mm de precipitación media anual. La zona cubre una superficie total de 96,38 km².

Materiales y métodos

Para el desarrollo del estudio se llevaron a cabo las siguientes fases de trabajo (figura 2):

- Obtención de cartografía base y cartografía temática de referencia (geología y geomorfología).
- Recopilación y análisis de información secundaria, estudios realizados en el área, información hidrometeorológica, entre otros.
- Selección y análisis de imágenes de satélite y fotografías aéreas disponibles de la zona, pertenecientes a diferentes épocas. Se eligieron aquellas que estuvieran libres de nubes y bandeamiento (por daño de sensor) en la zona correspondiente al área de estudio. Las imágenes contaban con resoluciones espectrales y espaciales adecuadas que permitieron obtener los productos deseados.
- Procesamiento digital de imágenes que incluye: conversión de formatos de imágenes, homologación de georeferenciación³, definición de las subescenas del área de interés, aplicación de realce radiométrico, espectral y espacial.
- Interpretación digital de imágenes con énfasis en geomorfología y dinámica fluvial, delimitación de la cabecera municipal de Villavicencio en las diferentes épocas evaluadas.
- Generación de mapas intermedios como insumos para el análisis de zonificación: geomorfología y dinámica fluvial y mapa de pendientes (con base en el modelo digital del terreno —en adelante, DTM—).

3 Todas las imágenes se trabajaron en el sistema de coordenadas Magna Sirgas Colombia - origen Bogotá.

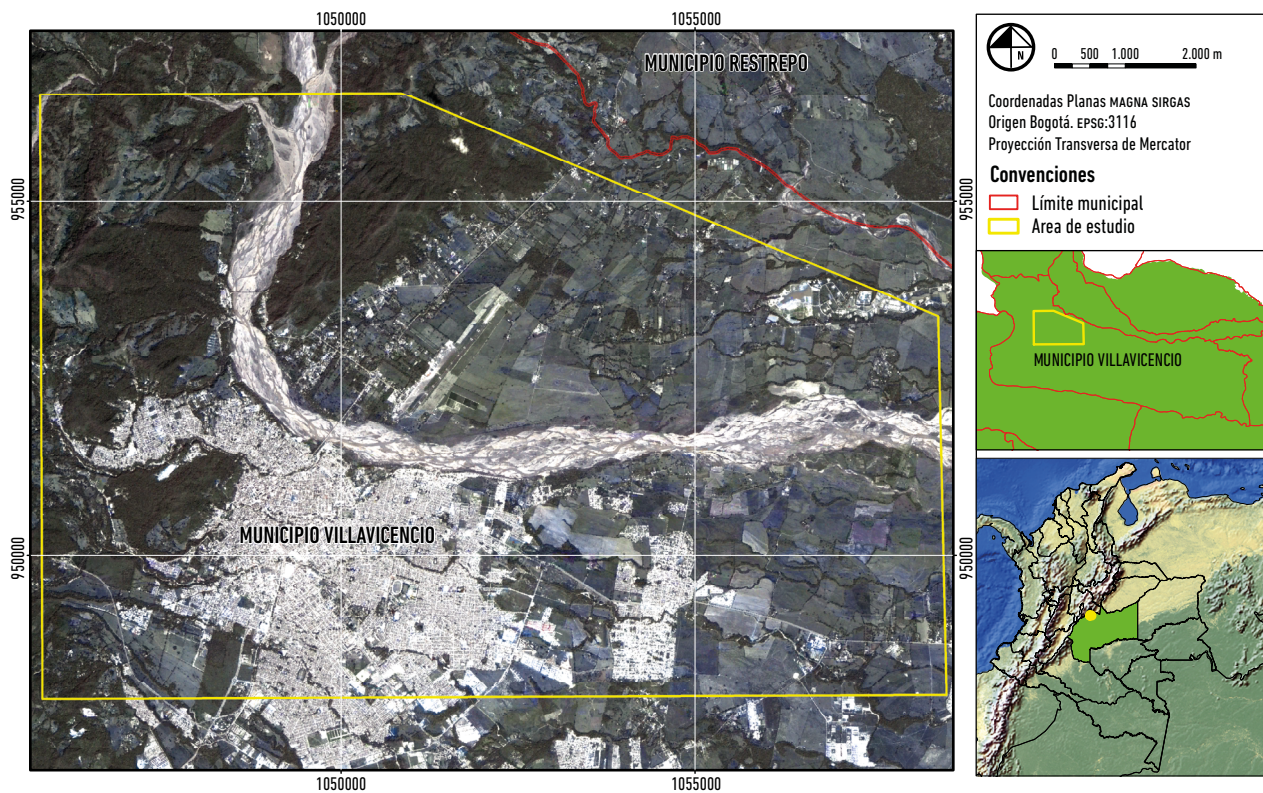


Figura 1. Localización general del área de estudio.
 Datos: elaborado a partir de cartografía base IGAC, imagen SPOT de 2007.

- Integración de información con ayuda de los sistemas de información geográfica —en adelante, SIG—, mediante operaciones de álgebra de mapas y análisis multicriterio, es decir, valoración cualitativa de cada una de las variables involucradas.
- Control de campo mediante sobrevuelos y recorridos de terreno.
- Zonificación de susceptibilidad por inundación a escala 1:25.000.

Con el objeto de establecer el comportamiento dinámico del río Guatiquía en el sector de la ciudad de Villavicencio, se identificaron y adquirieron productos de sensores remotos como fotografías aéreas e imágenes de satélite entre los años 1940 y 2010, con lo cual se desarrolló el análisis espacial requerido para la zonificación de la susceptibilidad a la inundación. Como herramientas digitales se utilizaron los SIG, ArcGIS, procesadores de imágenes (Erdas e Ilwis) (tabla 1).

Las imágenes de satélite fueron procesadas geométricamente, mediante procesos de georreferenciación y ortorectificación; asimismo se realizó un realce espacial

mediante sinergismos de imágenes Landsat (USGS 2018) y Spot. Las fotografías aéreas fueron digitalizadas, georreferenciadas y realizadas radiométricamente (contraste), para, posteriormente, ser incorporadas al sistema de información geográfico para la determinación de las relaciones espaciales. Es importante aclarar que para determinar la zonificación de susceptibilidad, se utilizaron imágenes correspondientes a un periodo de 21 años (1986, 1992, 2000 y 2007).

Análisis de variables

Hidrometeorología

La información de las estaciones hidrométricas utilizadas para el desarrollo del estudio se tomó del IDEAM (tabla 2) y se encuentra actualizada hasta el 2010. La estación hidrométrica más próxima al área de estudio corresponde a la estación Puente Abadía Méndez. Localizada aguas arriba de la zona de evaluación, se trata de una estación limnigráfica, con información de caudales, niveles máximos, medios y mínimos.

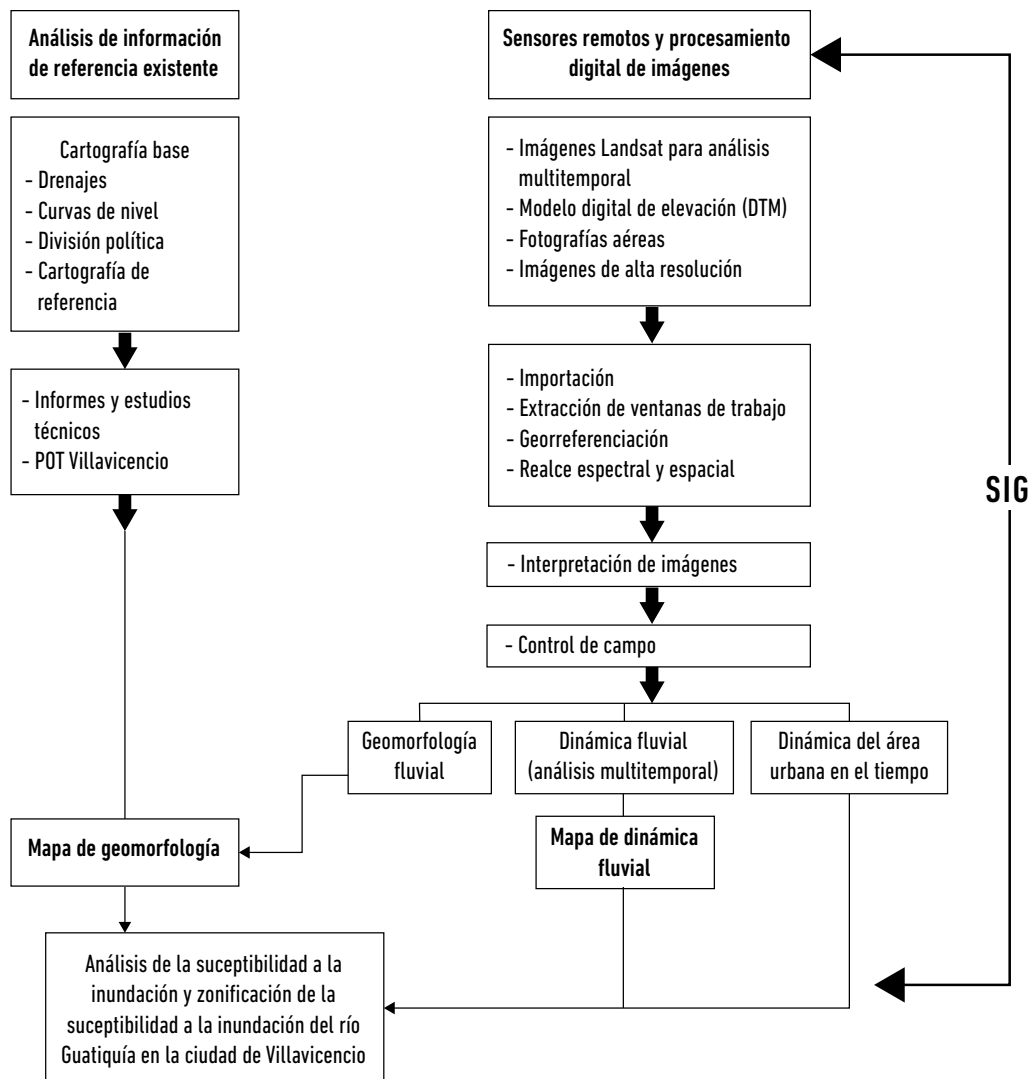


Figura 2. Esquema de la metodología de trabajo.

Tabla 1. Insumos utilizados para el Análisis de Susceptibilidad a la Inundación del río Guatiquía

Década/año	Producto o Sensor	Versión	Resolución Espacial (m) o Escala	Resolución Espectral	Fecha de Toma	Formato
40/1940	Fotografía Aérea*		1:35000	Monocromática	20-01-1940	Análogo
60/1965	Fotografía Aérea*		1:35000	Monocromática	13-05-1965	Análogo
80/1986	Landsat TM (Path 7 Row 57)	5	30	6	13-01-1986	BSQ
90/1992	Landsat TM (Path 7 Row 57)	5	30	6	4-10-1992	Geotiff
00/2000	Landsat ETM (Path 7 Row 57)	7	15 y 30	8	13-12-2000	Geotiff
00/2007	Landsat ETM (Path 7 Row 57)	7	15 y 30	8	31-01-2007	Geotiff
00/2007	Spot ^{..}		6-12	4		Geotiff
0/2008	Ortofotografía [·]		0,67	3		Geotiff
2010	Alos [§]	PRSIM	2	Pancromática	15-01-2010	Geotiff

Nota: * utilizada en el análisis multitemporal de dinámica poblacional; ^{..} imagen utilizada para mejorar la resolución espacial por sinergismo de la imagen Landsat del mismo año; [·] Con un cubrimiento apenas del 50% del área de estudio, utilizada para definir detalles al momento de la interpretación; [§] conformada por dos escenas, las cuales fueron utilizadas para definir el área de la cabecera municipal de Villavicencio.

Tabla 2. Información de estaciones meteorológicas

Código	TE	Nombre estación	Nombre de la corriente	Dpto.	Municipio	Elevación m.s.n.m.	Fecha instalación	Coordenadas WGS84	
								Lat.	Long.
35037100	LG	Puente Abadía	Río Guatiquía	Meta	Villavicencio	523	abr-68	4°4'0"	73°38'0"
3503507	CP	Unillanos	Río Guatiquía	Meta	Villavicencio	340	oct-83	4°7'0"	73°38'0"

Datos: IDEAM 2015.

Nota: TE: LG = limnigráfica, CP = climatológica principal.

Los datos de precipitación se obtuvieron de la Estación Unillanos. Se aprecia una zona con régimen de lluvias bimodal, con un primer periodo de lluvias en los meses de abril, mayo y junio, y un segundo ciclo de lluvias que presenta un pico en el mes de octubre. Las lluvias críticas están asociadas con la primera temporada y aportan cerca de 1.500 mm para los tres meses, que coinciden con las épocas en que se presentan procesos de inundación, particularmente, hacia mayo. La temporada seca comprende los meses de diciembre a febrero, con menos de 200 mm en total (figura 3).

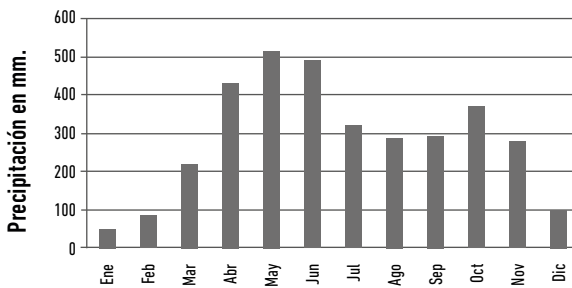


Figura 3. Precipitación mensual multianual - estación Unillanos.

Datos: IDEAM 2015.

Con el fin de conocer el comportamiento de la precipitación en un periodo de 18 años (1995 a 2012), se destacan los siguientes aspectos:

- La precipitación anual promedio es de 3.200 mm.
- Los años más lluviosos fueron 1998, 2002 y 2010, con cerca de 4.000 mm.

Las variaciones reflejan un potencial de inundabilidad mayor o menor en función de los excesos hídricos que se presenten. Así, por ejemplo, los años con precipitaciones superiores a 3.500 mm (figura 4).

Con relación a los caudales reportados por la estación Puente Abadía (río Guatiquía), esta zona tiene el mismo comportamiento bimodal de la precipitación (figura 3), con los mayores caudales para los meses de abril a junio. El segundo pico de caudales corresponde a septiembre-octubre, aunque los caudales son sensiblemente menores con respecto a la primera época de

lluvias. Estos caudales responden no solo a la precipitación local, sino también a todas las precipitaciones y escorrentía provenientes de las partes altas de la cuenca, razón por la cual, los caudales de los meses de diciembre a febrero (los de menor precipitación local), presentan unos volúmenes importantes para una época seca (figura 5).

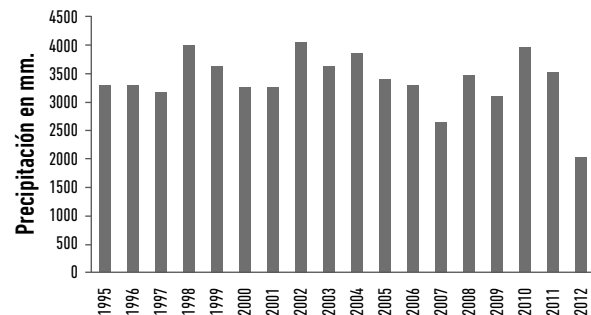


Figura 4. Precipitación anual multianual (18 años) - estación Unillanos.

Datos: IDEAM 2015.

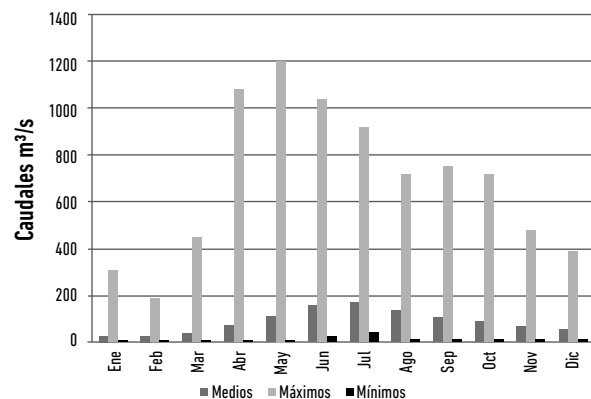


Figura 5. Caudales mensuales Puente Abadía, estación Puente Abadía, río Guatiquía.

Datos: IDEAM 2015.

En los niveles mensuales reportados para la misma estación, las curvas no presentan el mismo comportamiento de los caudales, lo cual puede deberse a la alta capacidad de evacuación de aguas del cauce, el cual se "expande", sin reflejar concentración de niveles altos del cauce (figura 6).

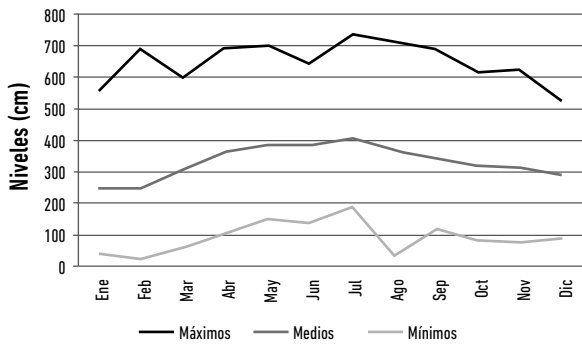


Figura 6. Niveles mensuales, estación Puente Abadía, río Guatiquía. Datos: IDEAM 2015.

Geología

La geología fue obtenida a partir de información secundaria correspondiente a los estudios del proyecto de recursos naturales de la cuenca Alta del río Guatiquía (Vargas 1998b). Este estudio fue orientado hacia la litoestratigrafía y geología estructural con uso de sensores remotos; adicionalmente, se tomó información del estudio *Zonificación Integral por amenazas Naturales para la Ciudad de Villavicencio - Meta* (Ministerio de Minas y Energía e Ingeominas 2003) que corresponde a la parte sur del área de interés combinado con la geología y memorias de la plancha 266 del Servicio Geológico Colombiano (SGC 2008).

Los sedimentos que llenan la parte baja de la cuenta están asociados al transporte de material erodado de las diferentes unidades geológicas. Así, es posible observar sobre el lecho de cauce desde cantos rodados de rocas sedimentarias hasta metamórficas. Los tamaños de estos cantos dan una idea de las altas energías de descarga que suponen este tipo de corrientes. Para el sector NW del departamento del Meta, se destaca el dominio de rocas sedimentarias y metamórficas del Cretáceo y sobre la zona de piedemonte depósitos aluviales del Cuaternario (figura 7).

Grupo Quetame (C0Q)

La mayoría de autores ha datado a esta unidad como del Cámbrico, sin embargo, algunos otros le han asignado una edad Cámbrico - Ordovícico. Este grupo infrayace a la Formación Brechas de Buenavista. El límite es erosivo y la base no está expuesta y, por lo tanto, se desconocen las relaciones estratigráficas con su yacente, lo que, a su vez, impide un cálculo del espesor real de la unidad.

Litológicamente, el grupo Quetame está constituido por rocas metamórficas de bajo grado de metamorfismo como filitas verdes, filitas grises y cuarcitas. En menor proporción, se presentan esquistos sericíticos, esquistos cloríticos y brechas catacláticas (SGC 2008).

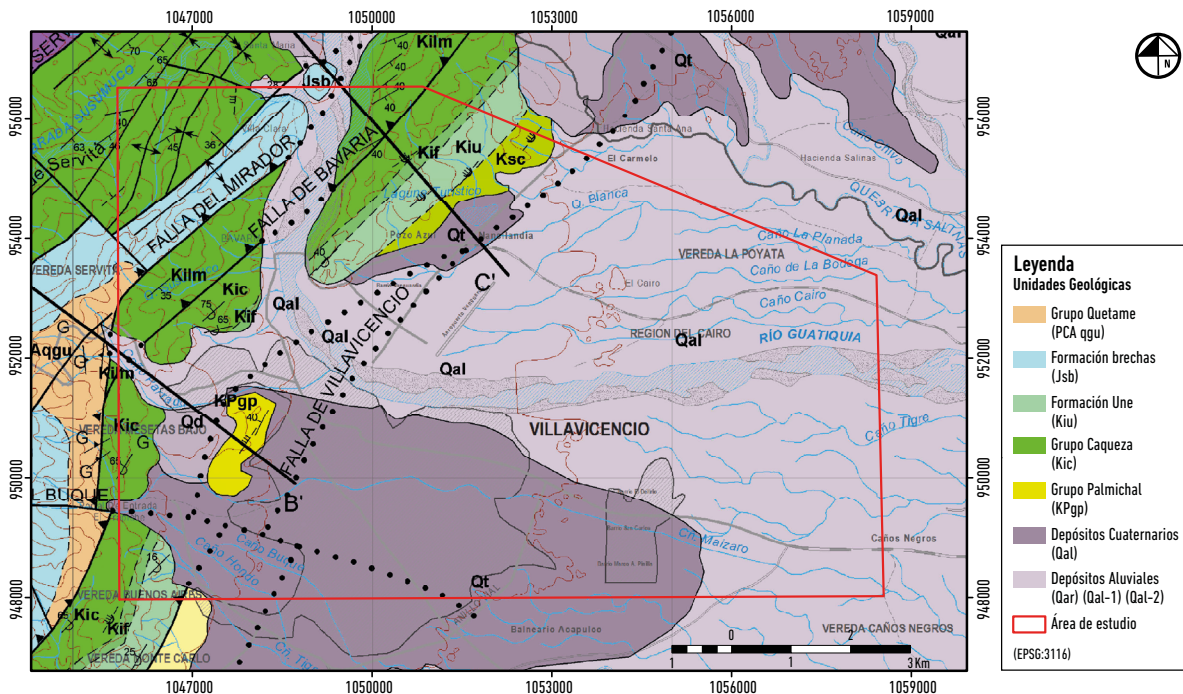


Figura 7. Marco geológico regional del área aledaña al municipio de Villavicencio. Datos: base cartográfica tomada de las planchas 1:100.000 (SGC 2008).

Formación Brechas de Buenavista (JBB)

Renzoni describe a las Brechas de Buenavista como “[brechas] conglomerado compuest[as] por guijos, guijarros y bloques de esquistos, cuarcitas, filíticas y de conglomerado similar al que se encuentra en la base de las Areniscas de Gutiérrez-Quetame” (Renzoni 1965, 93). El autor afirma que la unidad descansa inconformemente sobre rocas paleozoicas y supone que esté cubierta por capas cretácicas; además, Renzoni plantea un origen puramente local y establece primero una correlación con el grupo Girón y luego con la parte baja (eo. Mesozoicas) del grupo la Ardita, establecido por Segovia (1965).

El espesor de la formación Brechas de Buenavista es variable entre 150 y 70 m (Dorado Galindo 1984), supra-yace inconformemente a las rocas del grupo Quetame e infrayace a las rocas del grupo Cáqueza con un contacto fallado en el área. A esta unidad se le ha asignado una edad de Jurásico-Titónico (SGC 2008).

Grupo Cáqueza (KIC)

El nombre del grupo Cáqueza fue asignado por Hubach (1957). Su sección tipo se encuentra en la carretera Bogotá-Cáqueza, de edad cretácea inferior (Titónico-Hauteriviano); se ha dividido estratigráficamente en cuatro sectores descritos de base a techo:

- Sector I: conglomerado cuarcítico basal de cantos angulosos de cuarcita, espesor de 50 m.
- Sector II: lutitas negras y grises, generalmente piritosas y sericíticas, con intercalaciones de areniscas, espesor de 1.000 m.
- Sector III: lutitas piritosas con restos de vegetales y amonites, con algunas capas de caliza hacia la parte superior, espesor de 3.000 m.
- Sector IV: areniscas cuarcitas con intercalaciones de lutitas negras ferruginosas.

En el área de estudio, esta unidad limita al sur con la falla Mirador y las mejores exposiciones se encuentran a lo largo de las márgenes del río Guatiquía, especialmente, en la quebrada Argentina. Litológicamente, se conforma por una gruesa secuencia de lutitas negras con intercalaciones de calcarenitas y algunos niveles de areniscas grises y negras. Se presentan algunos conglomerados locales (SGC 2008).

Formación Une (KIU)

Areniscas cuarzosas en bancos gruesos, friables de color blanco a crema, de grano medio a grueso. Se presentan esporádicamente delgadas capas de lodolita gris y negra.

Localmente, presenta lentes de materia orgánica e impregnaciones de petróleo, con marcada estratificación (SGC 2008).

Grupo Palmichal (KTP)

Arenisca arcillosa de color blanco o crema, friable, grano medio a grueso, conglomeráticas, con algunas intercalaciones de lodolitas grises laminadas y niveles de areniscas impregnadas de petróleo (SGC 2008).

Depósitos cuaternarios

En el área de estudio se presentan depósitos cuaternarios de diferente origen y composición que cubren parcialmente las rocas más antiguas. Estos depósitos se han clasificado en: depósitos de llanuras aluviales, depósitos torrenciales, depósitos de grandes conos de deyección, depósitos de terrazas aluviales y depósitos aluviales recientes (SGC 2008).

Los depósitos de llanuras aluviales (Qal) se localizan al oriente del área de estudio, comprenden sedimentos y clastos depositados en antiguas llanuras de inundación asociadas con el río Guatiquía (SGC 2008). Litológicamente, se componen de conglomerados con niveles de arenas y limos, su espesor no ha sido determinado, pero en los escarpes del río Guatiquía supera los 10 m.

Los depósitos de grandes conos de deyección (Qda) se localizan en el área de influencia urbana del municipio de Villavicencio, donde se presenta un gran abanico asociado al cauce del caño Buque y en parte al caño Maizaro. Debido a su naturaleza de deposición repentina este depósito consta de materiales angulosos de diferentes tamaños en una matriz limo-arenosa poco compacta y su espesor es incierto (SGC 2008).

Los depósitos aluviales recientes (Qar) se presentan en el cauce mayor del río Guatiquía y los cauces menores representan materiales sueltos de bloques, guijos y gravas de rocas predominantemente sedimentarias con barras de arenas y limos en niveles o entremezclados con los fragmentos.

Los depósitos de llanura aluvial baja (Qal-1) corresponden a sedimentos recientes depositados por caños y ríos del área, y forman terrazas bajas con alturas no mayores a 2 m. Se trata de depósitos clastos soportados con bloques de máximo un metro, de diferente composición de matriz areno-limosa. Los depósitos de llanura aluvial intermedia (Qal-2), por su parte, se componen de sedimentos recientes depositados principalmente por el río Guatiquía, que se encuentra formando por niveles de terrazas de no más de 4 m. de espesor. Son depósitos clastos soportados con bloques heterométricos de diferente composición, dependiendo de la zona de aporte de materiales (SGC 2008).

Desde un punto de vista estructural, en el área se registran dos fallas geológicas de importancia: la Falla de Villavicencio y la Falla de Mirador. La Falla Villavicencio es un sistema de dirección noreste-sureste, de cabalgamiento, ángulo bajo y longitud mayor a los 40 km. En el sector de la plancha 266 del SGC, se encuentra totalmente cubierta por sedimentos del cuaternario y se reconoce básicamente mediante la interpretación de rasgos geomorfológicos en imágenes de radar. Cerca al río Guayuriba, donde inicia su curso hacia las llanuras, así como en los alrededores del río Guatiquía, donde cambia su curso norte-sur a occidente-orientado, estas dos fallas convergen formando un solo trazo y hacen parte del gran sistema de falla frontal de la cordillera oriental (SGC 2008).

La Falla Mirador presenta una dirección noreste, de cabalgamiento, de ángulo relativamente bajo, buzante al oeste; pone en contacto la secuencia metamórfica de

Quetame con las lutitas de Macanal. Esta falla afecta las rocas del cretácico y del jurásico superior; al sureste está truncada por el sistema de fallas de Villavicencio-Colepato. La zona de falla en el sitio mirador, a un kilómetro al noreste de la ciudad de Villavicencio, presenta una extensión mayor a 200 m, con alto cizallamiento de la roca, lo que, en la época de intenso invierno, trae consigo continuos deslizamientos y alteraciones de la banca de la carretera que conduce a Bogotá (SGC 2008).

Geomorfología

La clasificación de las unidades geomorfológicas se definió desde un punto de vista morfogenético. Los ambientes morfogenéticos que intervinieron en la formación de geoformas en el área de estudio corresponden a unidades de tipo fluvial, denudacional y denudacional estructural (Vargas Cuervo 1998b) (figura 8).

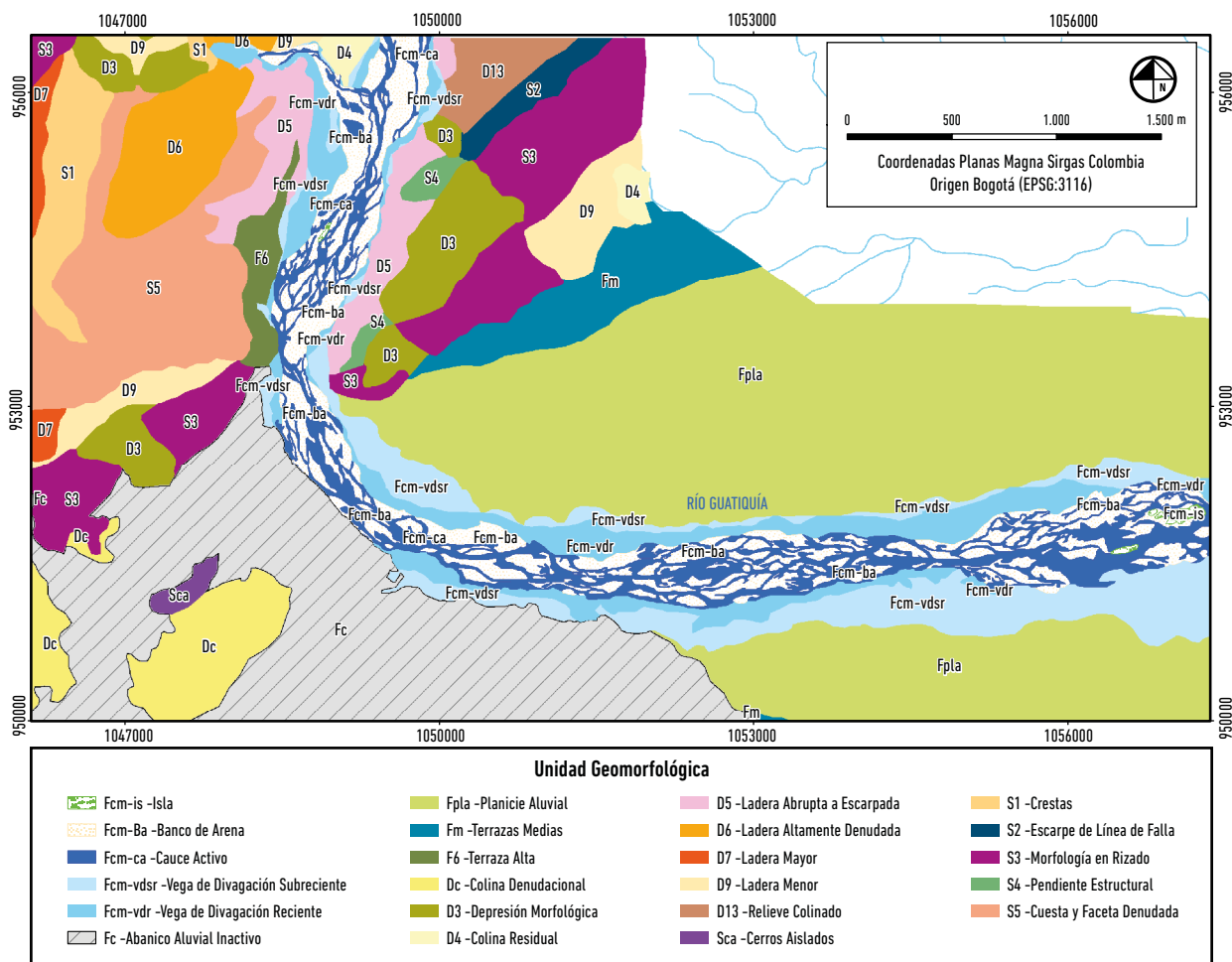


Figura 8. Unidades geomorfológicas río Guatiquía–municipio de Villavicencio. Datos: modificado de Vargas Cuervo 1998b.

Formas de origen fluvial

Las unidades que se identificaron fueron las siguientes: vega de divagación reciente, vega de divagación subreciente, cauce activo, islas fluviales, bancos de arena, abanico aluvial inactivo, planicie aluvial, terraza media y terraza alta.

Las vegas de divagación reciente (Fcm-vdr) corresponden a parte del lecho mayor del río Guatiquía, donde este ha discurrido recientemente y se caracterizan por ser una unidad de morfología plana en la zona más baja del área de estudio, y en la margen izquierda alcanzan un ancho de 300 m.

Las vegas de divagación subreciente (Fcm-vdsr) se diferencian de las de divagación reciente en que estas son más antiguas, ocupan una extensión más amplia del área del lecho mayor (llegan a alcanzar 800 m de ancho) y se localizan en la parte baja del área de estudio.

El cauce activo (Fcm-ca) representa el área por donde discurre el agua. Se definió a través de la interpretación de imágenes de satélite correspondientes al 2007. Las islas fluviales (Fcm-is) se localizan sobre el cauce activo y corresponden a islas de carácter temporal, interpretadas para el 2007. Los bancos de arena (Fcm-Ba) corresponden a barras de arena o playas localizadas sobre el cauce activo en zonas de sedimentación, son de carácter temporal y están interpretados para el 2007.

El abanico aluvial inactivo (Fc) se localiza sobre el área del casco urbano de Villavicencio; este abanico o cono de deyección se asocia con un evento súbito relacionado con el Caño Buque (Vargas Cuervo 1998a), con pendientes suaves entre los 0 y 10°. El patrón de drenaje es dicotómico incipiente y de densidad baja.

La planicie aluvial (Fpla), que corresponde a zonas que topográficamente comienzan siendo planas y pasan a ser suavemente inclinadas, incluye materiales fluviales provenientes de fuentes lejanas y canales fluviales de la zona como los ríos Guatiquía, Ocoa y Guayuriba. Incluye canales abandonados y zonas pantanosas. Dicha planicie conforma las extensas llanuras de los llamados Llanos Orientales de Colombia (Ministerio de Minas y Energía e Ingeominas 2003).

La terraza media (Fm) es una unidad de morfología que va de plana a ligeramente ondulada, correspondiente a depósitos fluvio-torrenciales delimitados por escarpes de alturas hasta de cuatro metros, sujetas a inundaciones o avenidas torrenciales extraordinarias (Ministerio de Minas y Energía e Ingeominas 2003) y la terraza alta (Fa) está asociada al cauce del río Guatiquía en el sector de la Quebrada Negra y Puente Abadía, sobre la margen derecha del río, y corresponde a niveles de terrazas antiguas,

con alturas sobre el nivel del río hasta de 50 m. (Vargas Cuervo 1998b).

Formas de origen denudacional

Las unidades que se identificaron en el área de estudio son colina denudacional, depresión morfológica, colina residual, laderas abruptas y escarpadas, ladera altamente denudada, ladera mayor, ladera menor y relieve colinado (Vargas Cuervo 1998b).

La colina denudacional (Dc) es unidad con morfología ondulada de colina y laderas moderadamente inclinadas. Estas se encuentran disecadas por los drenajes de forma poco profunda. Dichas colinas y laderas se consideran de inestabilidad intermedia por encontrarse esporádicamente afectadas por el escurrimiento de los suelos, los procesos de remoción en masa y por antiguas coronas de deslizamiento hacia los drenajes (Ministerio de Minas y Energía e Ingeominas 2003).

La depresión morfológica (D3) representa depresiones morfológicas sobre la ladera asociada con los micro-cauces. Esta geoforma es muy característica de la zona de piedemonte, tiene un relieve relativo bajo a moderado, de pendientes inclinadas a escarpadas, de longitudes cortas a largas, con formas cóncavas y complejas, drenaje dendrítico, de densidad de drenaje moderada a severa.

La colina residual (D4) representa colinas prominentes y aisladas con respecto a su entorno. Se formó a partir de material rocoso más resistente a la erosión que los materiales vecinos. Una geoforma bastante característica de este tipo se localiza sobre el valle del río Guatiquía, en el sector de confluencia con la quebrada Argentina, sobre la vía a Restrepo. Sus formas de relieve van de muy bajo a bajo, moderadamente inclinadas a escarpadas, de laderas con longitudes cortas, de formas rectas, drenaje de forma radial incipiente y de baja densidad.

Las laderas abruptas a escarpadas (D5) son geoformas producidas por la erosión del río Guatiquía, de relieve bajo, con pendientes abruptas a escarpadas, cortas a moderadamente largas, formas rectas, drenaje paralelo y subparalelo, y de densidad baja a moderada. La ladera altamente denudada (D6) representa depresiones morfológicas de microcuencas o de laderas con procesos severos de erosión y remoción en masa. Dichas laderas se localizan principalmente en la región de piedemonte. En general, presentan un relieve relativo bajo, pendientes inclinadas a escarpadas, de longitud corta a larga, de formas cóncavas e irregulares, drenaje dendrítico y disección o densidad de drenaje severa. La ladera mayor (D7) se presenta en la margen derecha del río Guatiquía en la región de San

Cristóbal. Se trata de laderas de relieve relativo moderado a muy alto, de pendientes inclinadas a escarpadas, de longitud moderadamente larga a extremadamente larga, de formas rectas, drenaje subparalelo y densidad de drenaje baja a moderada. La ladera menor (D9) representa laderas de bajo relieve, de pendientes inclinadas a abruptas, de longitudes cortas a moderadamente largas, de forma recta, drenaje paralelo a subdendrítico, de densidad de drenaje baja a moderada.

El relieve colinado (D13) representa una morfología de colinas suavemente onduladas, que se manifiesta en general en un relieve bajo, de pendientes moderadamente inclinadas, longitud moderadamente larga, forma convexa, drenaje subdendrítico y baja densidad.

Formas de origen denudacional estructural

Durante el desarrollo de estas geoformas han intervenido diversas estructuras geológicas, como estratificación, fallas, lineamientos, etc., en conjunto y con procesos denudativos (Vargas Cuervo 1998a). Las unidades identificadas en este ambiente son cerros aislados, crestas, escarpe de línea de falla y morfología en rizado.

Los cerros aislados (Sca) son colinas o cerros disectados estructuralmente por fallamiento, que forman salientes de roca prominente. Son moderadamente inestables y a ellos se asocian los depósitos de talud.

Las crestas (S1) presentan morfologías prominentes con respecto a la de su entorno y siguen grandes extensiones. Son formas controladas parcialmente por la litología y la estratificación de las rocas, las fallas geológicas y los lineamientos estructurales. En general, son de relieve relativo bajo, de pendientes abruptas a escarpadas, moderadamente largas, de forma recta, drenaje subparalelo de baja densidad.

El escarpe de línea de falla (S2) se caracteriza por presentar un relieve relativo bajo, tener pendientes abruptas a escarpadas, de longitud corta, forma recta y densidad de drenaje baja. La morfología en rizado (S3) representa colinas de dirección NE. Se caracteriza por presentar laderas en forma de rizado, debido a la alternancia de capas estratificadas. En general, dicha morfología presenta un relieve relativo bajo a moderado, de pendientes inclinadas a escarpadas, moderadamente largas a largas, de formas irregulares, drenaje subparalelo a subdendrítico, moderadamente denso.

La pendiente estructural (S4) está conformada por laderas en las que la inclinación coincide con planos estructurales, ya sea por estratificación, foliación, diaclasas, fracturas, fallas, etc. Dichas laderas se caracterizan por presentar un relieve relativo bajo a moderado, pendientes inclinadas, de

longitud corta a larga, de forma recta y drenaje subparalelo de baja densidad.

Las cuestas y facetas denudadas (S5) representan la evolución geológica y estructural de una serie de bloques levantados y hundidos que sufrieron posteriormente erosión natural. En general, estas geoformas se caracterizan por presentar un relieve relativo alto, pendientes inclinadas a escarpadas, largas a muy largas, de forma recta y compleja, drenaje subdendrítico, con densidad de moderada a alta.

Dinámica fluvial

La dinámica fluvial, entendida como la variación espacial ocurrida a través del tiempo de un cauce activo, se debe a variaciones continuas de los caudales que, a su vez, se reflejan en cambios del poder erosivo del cauce. Las condiciones de la dinámica fluvial dependen, entre otros factores, de la pendiente del terreno, la morfología dominante, la pluviosidad y la capacidad de transporte de sedimentos de la corriente.

Para las áreas de piedemonte y llanuras aluviales, se destaca el dominio de 4 tipos de canales (Texeira et al. 2000): rectilíneos, meandriformes, entrelazados y anastomosados (figura 9).

Se hace énfasis en estos tipos de canales, que son los que se espera encontrar en el área de estudio.

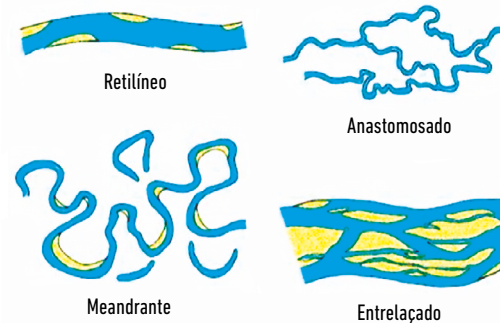


Figura 9. Tipos de canales fluviales en áreas de piedemonte y llanuras. Datos: Texeira et al. 1997, adaptado por Miall 1996.

La diferenciación de los tipos de cauce está dada por dos características principales: el número de canales y la sinuosidad. A continuación, se ilustra el tipo de canal en función de estas variables (tabla 3).

Tabla 3. Tipos de canales en función del número de canales y la sinuosidad

Sinuosidad	Número de canales	
	Unicanal	Multicanal
Baja	Rectos	Entrelazados
Alta	Meandriforme	Anastomosados

Así mismo, para cada tipo de canal identificado se tienen características particulares de morfología, sinuosidad, relación ancho/profundidad y tipos de depósitos generados (tabla 4).

El área de estudio el canal del río Guatiquía corresponde a un río anastomosado, que se caracteriza por:

[...] el desarrollo de una sucesión compuesta por canales (CH II), depósitos de desbordes (CS I y CS II) y de planicie de inundación (OF).

Este conjunto define un sistema fluvial con canales interconectados múltiples, de baja sinuosidad y con escasa participación de depósitos de acreción lateral. Los canales muestran relaciones multilaterales o localmente aparecen aislados dentro de los depósitos de llanura de inundación. Los depósitos de desbordes son frecuentes y desarrollan potentes lóbulos en los sectores distales. Estas acumulaciones fluviales son comunes en zonas de bajo gradiente, con sistemas agradantes que provocan episodios de desbordamiento y avulsión. La arquitectura a gran escala es homologable a sistemas anastomosados y representa bajas condiciones energéticas cerca del nivel de base. [...] La densidad de canales es baja, dando como resultado a gran escala un dominio general de depósitos de planicie de inundación y desbordes. (Armas y Sánchez 2011, 143-144)

En la figura 10 se ilustra el carácter anastomosado del río Guatiquía a la altura de Villavicencio, donde se destacan los múltiples canales que lo conforman y las islas y barras conformadas a lo largo de este cauce.

Análisis multitemporal del cauce activo del río Guatiquía

Teniendo en cuenta el tipo de cauce y las condiciones geomorfológicas de las áreas aledañas al río Guatiquía,

se desarrolló un análisis multitemporal del comportamiento de su cauce, para lo cual se utilizaron imágenes de satélite correspondientes a 1986, 1992, 2000 y 2007, las cuales fueron referenciadas en el sistema de coordenadas Magna Sirgas Bogotá.



Figura 10. Vista aérea del río Guatiquía a la altura del municipio de Villavicencio.

Fotografía de Vargas Cuervo 2017.

La interpretación visual se basó en la delimitación del cauce activo, los bancos de arena e islas en cada uno de los periodos analizados, de esta manera se establecieron sus variaciones espaciales en el curso del tiempo.

En las figuras 11 a 14 se presentan los resultados de la cartografía fluvial de cada periodo, permitiendo observar la tendencia del cauce activo en el corredor de divagación del cauce o lecho mayor, así como la gran capacidad de este para la acumulación de sedimentos, los cuales obligan al río a realizar cambios continuos de los diferentes canales, así mismo, evita la conformación de un cauce principal a lo largo del tiempo que controle la dinámica fluvial.

Tabla 4. Características de los cauces

Tipo de cauce	Morfología	Sinuosidad	Ancho/ prof.	Barras
Recto	Único cauce con estanques y rápidos, talweg escasamente sinuoso.	Cercana a 1	< 40	Oblicuas y longitudinales
Meandriforme	Único cauce con estanques y rápidos, talweg sinuoso.	> 1,5	< 40	Barras en espolón
Entrelazado	Dos o más cauces con barras y perímetro inestables.	> 1,3	> 40	Dominan barras centrales
Anastomosado	Dos o más cauces con barras y perímetro estables.	> 2,0	< 10	Muy variable

Datos: Romel 1997.

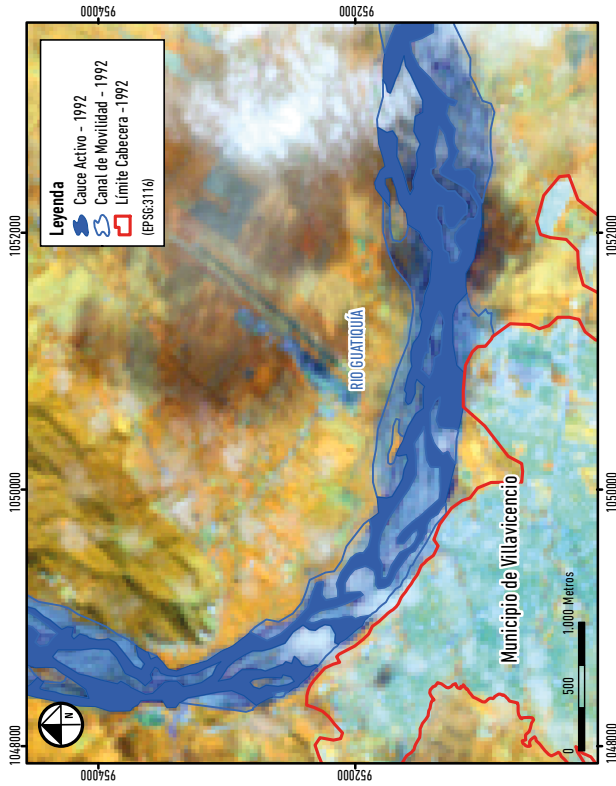


Figura 12. Interpretación del cauce activo en 1992.

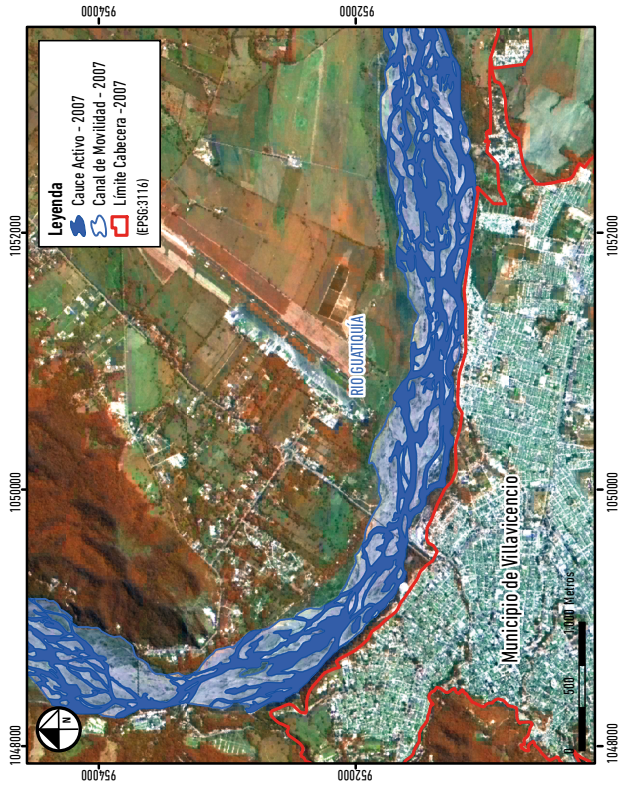


Figura 14. Interpretación del cauce activo en el 2007.

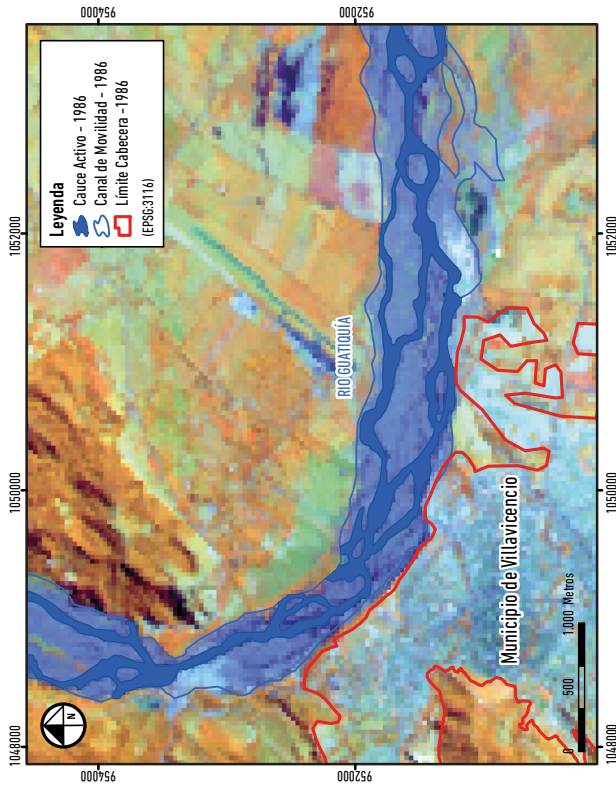


Figura 11. Interpretación del cauce activo en 1986.

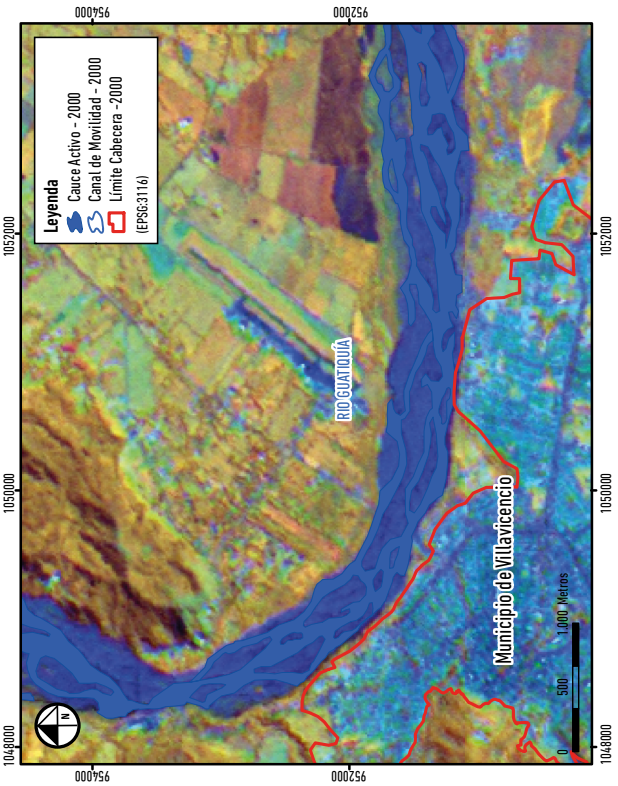


Figura 13. Interpretación del cauce activo en el 2000.

Mediante la superposición de los periodos estudiados (1986, 1992, 2000 y 2007), se destacan los siguientes aspectos (figura 15):

- El río Guatiquía en la zona muestra un comportamiento de cauces trenzados a anastomosados que comprenden o cubren gran parte de su lecho mayor.
- No han ocurrido en los periodos analizados, desbordes por fuera del lecho mayor.
- Los procesos de erosión activa se marcan en la margen derecha del río Guatiquía por la acción de los canales activos sobre el borde del lecho mayor.
- Sobre estas zonas de erosión activa se localiza la zona urbana de Villavicencio.

Teniendo en cuenta la envolvente de los cauces activos entre 1986 y 2007, se presenta en la siguiente figura 16 el canal de movilidad, el lecho mayor y los cauces activos (figura 16).

Análisis multitemporal de la dinámica poblacional

Para complementar el estudio, se ha incluido un análisis sobre los cambios de perímetro urbano de Villavicencio a través del tiempo, con el propósito de tener un panorama más amplio de la interrelación entre la dinámica fluvial y la ocupación del terreno.

Para este propósito, a partir de fotografías aéreas e imágenes de satélite se interpretó el límite urbano de Villavicencio con información desde 1940 hasta el 2007.

A continuación se muestra cómo ha crecido con el tiempo este municipio. Estos cambios están relacionados directamente con el crecimiento de la población, con un núcleo inicial en la zona de piedemonte (1940) y una extensión progresiva del perímetro de forma radial (figura 17).

Para la dinámica fluvial, la información del perímetro urbano de las épocas analizadas se condensó en un

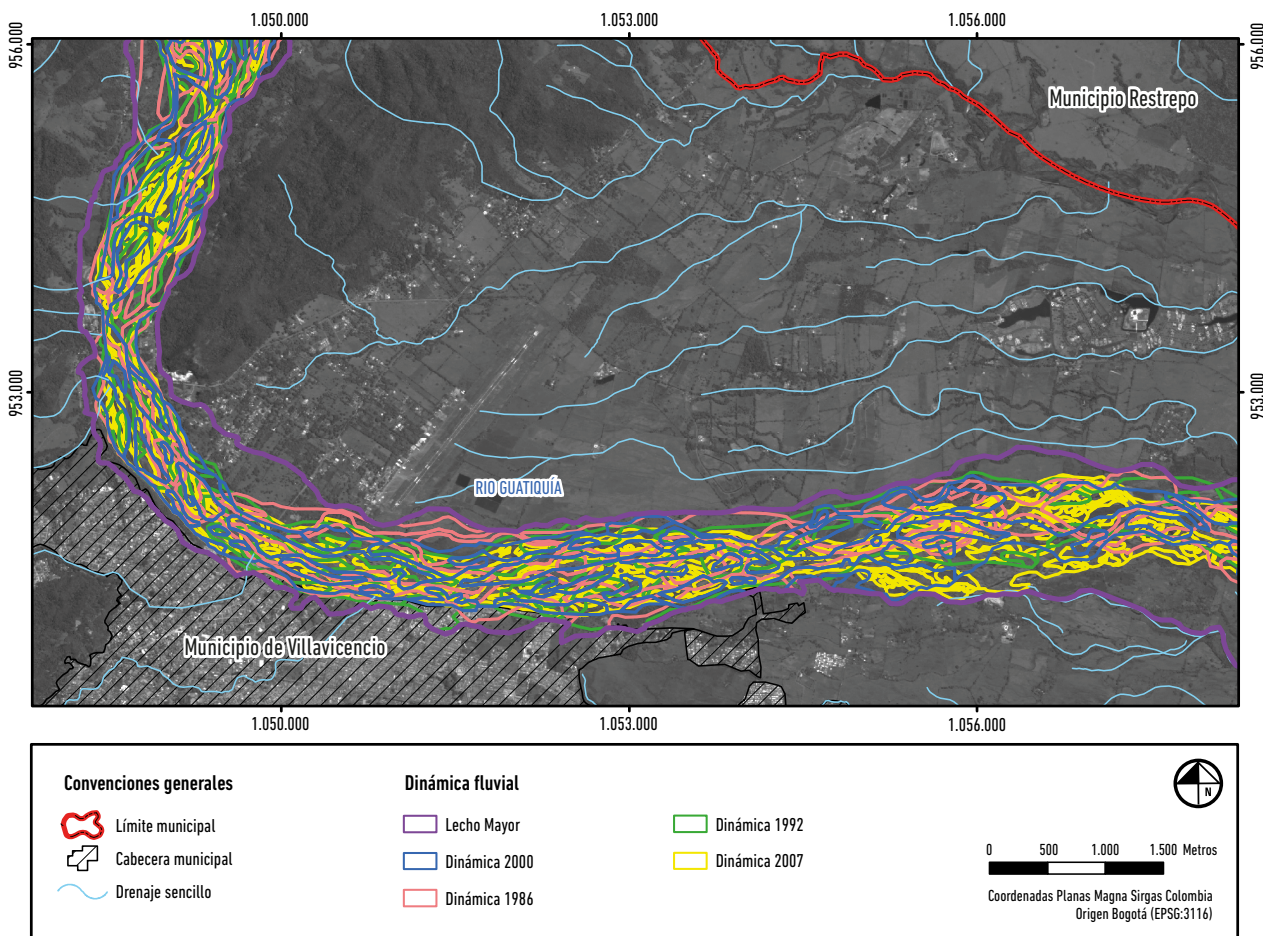


Figura 15. Dinámica fluvial del río Guatiquía.

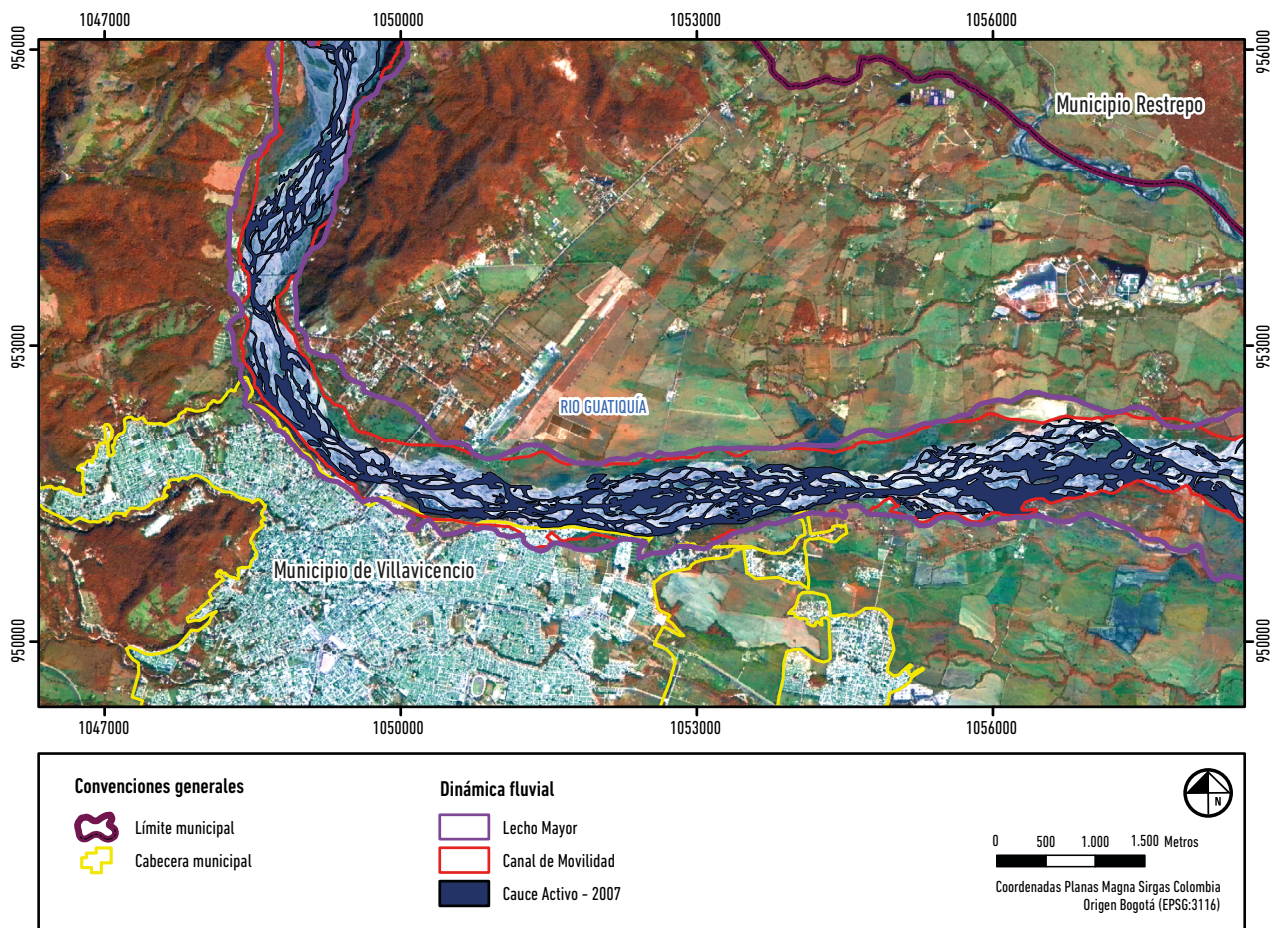


Figura 16. Canal de movilidad y lecho mayor del río Guatiquía.

solo mapa (figura 18), con el fin de tener un panorama del cambio de la ciudad. Para ello, se utilizó una escala de colores, donde los tonos verdes indican los perímetros más antiguos, mientras que los rojos señalan los más recientes.

Como se puede ver en la anterior figura, el crecimiento de la ciudad ha presentado una fase de ocupación de las rondas de protección del río Guatiquía, en particular, a partir de la década de los noventa, aun cuando en la década de los ochenta la parte alta del municipio ya estaba completamente ocupada. Por su parte, hasta las décadas de los sesenta y setenta hubo buenas condiciones de aislamiento del perímetro urbano y la ronda de protección del río.

Las grandes transformaciones demográficas en Villavicencio se dieron especialmente entre 1973 y 1985, con una tasa de crecimiento censal del 7,1% (Alcaldía de Villavicencio 2013), y la ciudad se ha expandido como

respuesta a su desarrollo poblacional; sin embargo, este se ha dado de forma desordenada, si se tiene en cuenta que la ocupación del terreno no ha sido orientada por políticas de planeación estratégica y la mitigación de riesgos. Tal desarrollo poblacional desordenado se evidencia en el hecho de que la ocupación urbana entra en el lecho mayor del río Guatiquía.

Zonificación de la susceptibilidad a inundación

La susceptibilidad a sufrir inundaciones asociadas a un lecho fluvial se manifiesta por las características intrínsecas del terreno por su geología, geomorfología y morfodinámica. Es importante tener en cuenta que, muchas de las llamadas inundaciones que ocurren en el lecho mayor son procesos naturales por la amortiguación natural del cauce. Los desbordes por fuera del lecho mayor son considerados procesos externos de desbordes e inundaciones extremas de inundación (Vargas Cuervo 2008b).

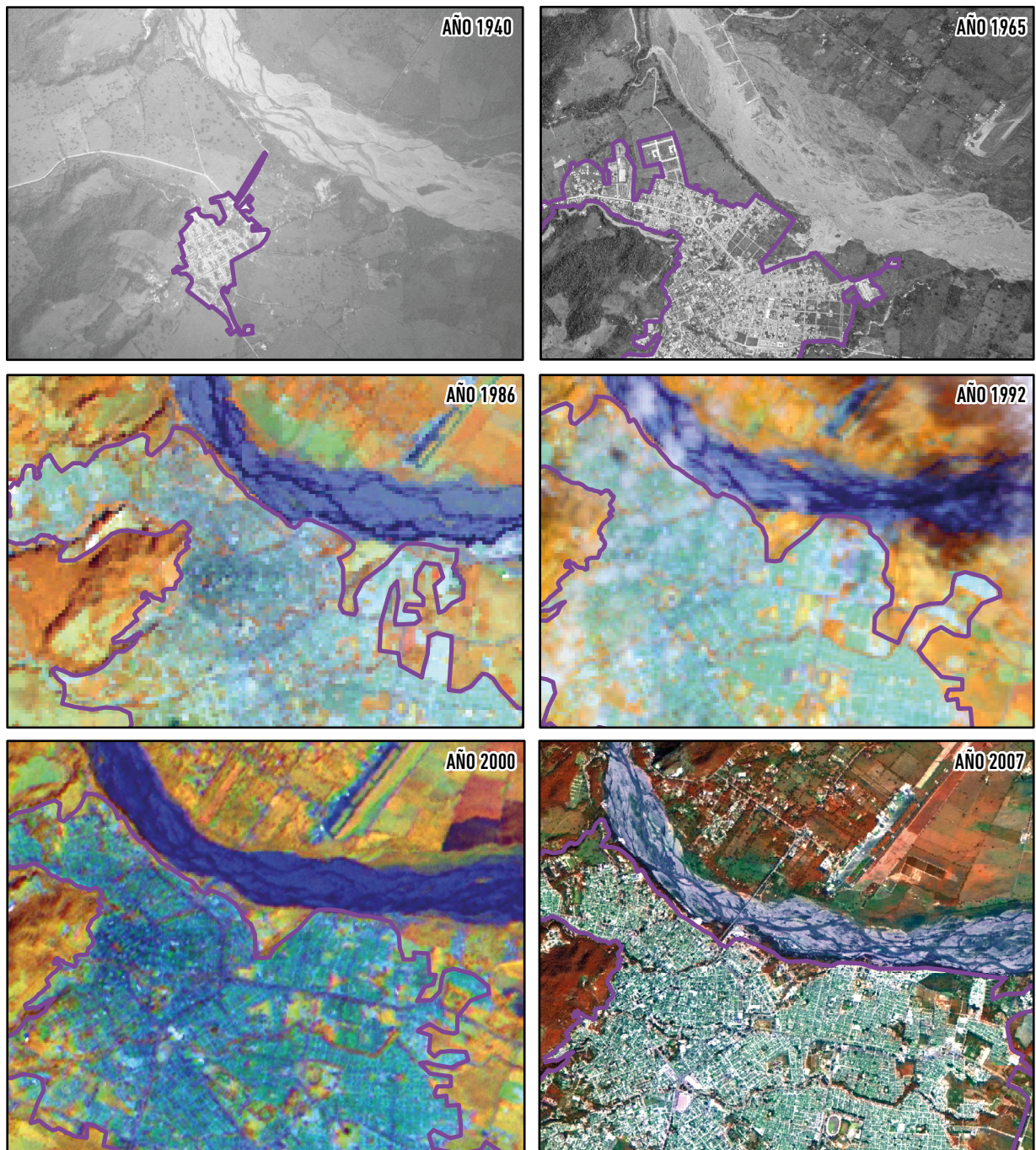


Figura 17. Expansión del perímetro urbano de Villavicencio durante el periodo evaluado (1940-2007).

Nota: EPSG 3116.

En este sentido, la reconstrucción de diversas épocas de la dinámica fluvial (entendido como análisis multitemporal) representa el comportamiento natural del cauce como se presentó en párrafos anteriores. Los eventos históricos se asocian con reportes de la población y autoridades locales que activan planes de atención ante situaciones de emergencia.

A continuación se registran algunos reportes de las inundaciones ocasionados por el río Guatiquía. Debe tenerse en cuenta que estos reportes se asocian, por lo general, a afectaciones directas de la población. Así mismo, es probable que estos eventos se presentaran en el pasado cuando estas áreas no estaban ocupadas o urbanizadas y, por esta razón, no se generaban emergencias (tabla 5).

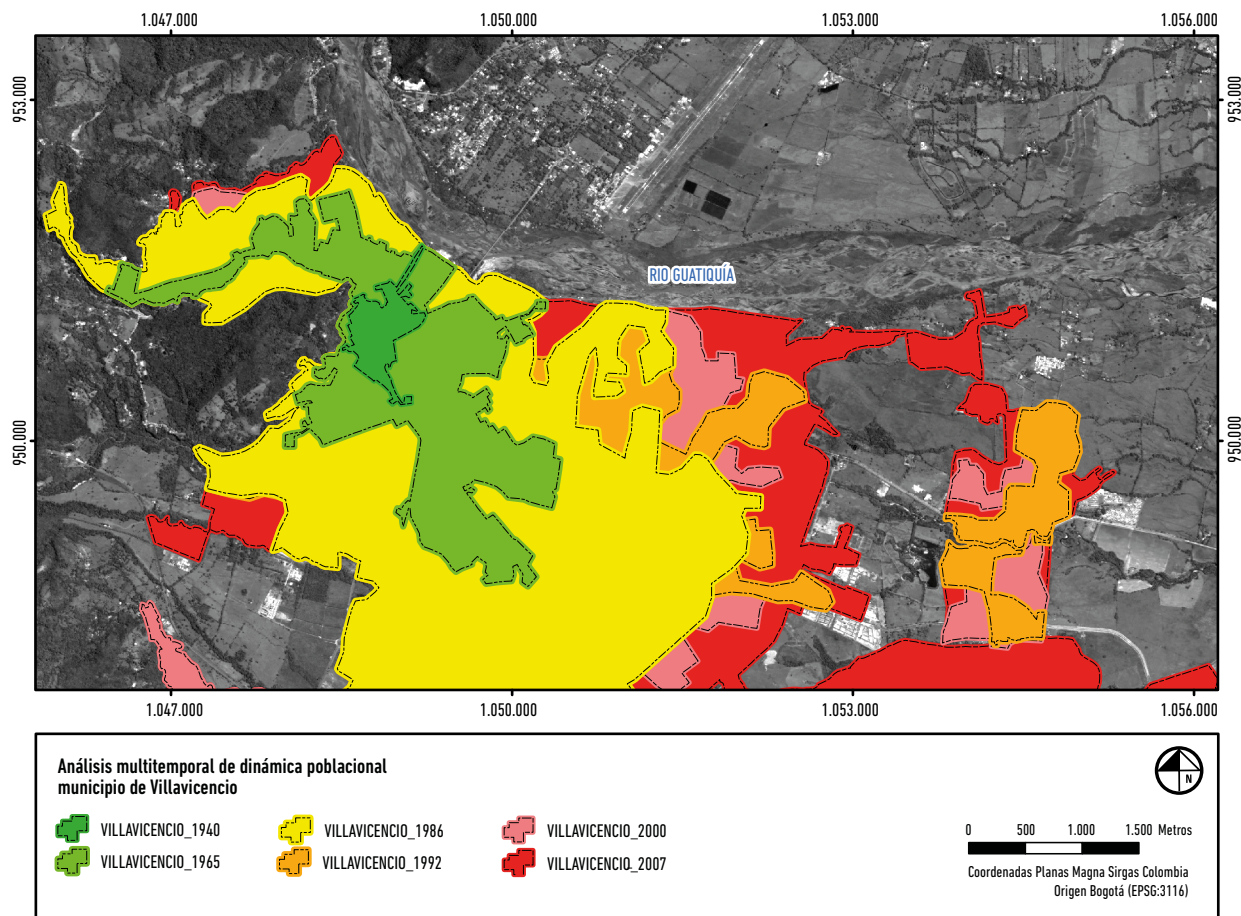


Figura 18. Dinámica de expansión de Villavicencio en un periodo de 67 años.

Tabla 5. Reportes de eventos de inundaciones causados por el río Guatiquía

Año	Lugar afectado (vereda/barrio)	Sector	Magnitud	Fuente
1992	El Paraíso	U	DM	Llanos 7 días
1992	Madrigal	U	DM	Llanos 7 días
1992	Santa Helena	U	DM	Llanos 7 días
1997	La Esperanza	U	DM	Llanos 7 días
1997	Dosmil	U	DM	Llanos 7 días
1997	Guatiquía y camino real	U	DM	Llanos 7 días
1997	El Espejo y Villa Suarez	U	DM - PH	Llanos 7 días
1997	Calamar	U	DM	Llanos 7 días
1997	Parcelas del Progreso	R	DM	Llanos 7 días
1997	Aeropuerto Vanguardia	R	DM	Llanos 7 días
2001	Parcelas del Progreso	U	DM	Llanos 7 días
2001	Puente Abadía	R	DM	Llanos 7 días
2002	Aeropuerto Vanguardia, veredas Vanguardia y La Aurora	R	DM	Llanos 7 días
2011	16 veredas	U	DM -PH	Llanos 7 días

Nota: (R) rural, (U) urbano, (PH) pérdidas humanas, (DM) daños materiales.

De la anterior tabla también se concluye que la mayoría de eventos afectaba a la población urbana y aquellos que incidían sobre la población rural estaban relacionados con pérdidas económicas o de infraestructura.

Para determinar la zonificación de la susceptibilidad a inundaciones, en este estudio se tuvieron en cuenta las unidades geomorfológicas que, junto con los resultados del análisis multitemporal, valoraron las áreas afectadas (atendiendo a los registros de los reportes sobre inundaciones) y definieron las áreas de susceptibilidad en función del potencial grado de afectación.

Para lo anterior, se ha tenido en cuenta una escala cualitativa de calificación de la susceptibilidad, de la siguiente forma (figura 19):

- **Media-alta:** en esta categoría se localizan las áreas correspondientes a las vegas de divagación subreciente, corresponde al área natural de inundación del lecho mayor.
- **Alta:** bajo esta categoría se ubican las áreas correspondientes a las vegas de divagación reciente, corresponde

al área natural de inundación del canal de movilidad y el lecho mayor.

- **Muy Alta:** corresponde a las zonas de influencia fluvial, como son los bancos de arena e islas fluviales, corresponde principalmente al canal de movilidad de los cauces activos y aquí representan procesos naturales.

Análisis de resultados

Con el fin de combinar los criterios del análisis multitemporal de la dinámica fluvial y de ocupación del terreno para entender la génesis de la problemática generada por las inundaciones, a continuación se integran los escenarios evaluados en el tramo estudiado del río Guatiquía y su interacción con el municipio de Villavicencio.

Del análisis multitemporal en torno a la dinámica fluvial se han tomado los límites que definen el lecho mayor y que corresponden a las fronteras naturales de migración lateral del cauce. Para la dinámica de ocupación del territorio, se consideró toda la exigencia obtenida

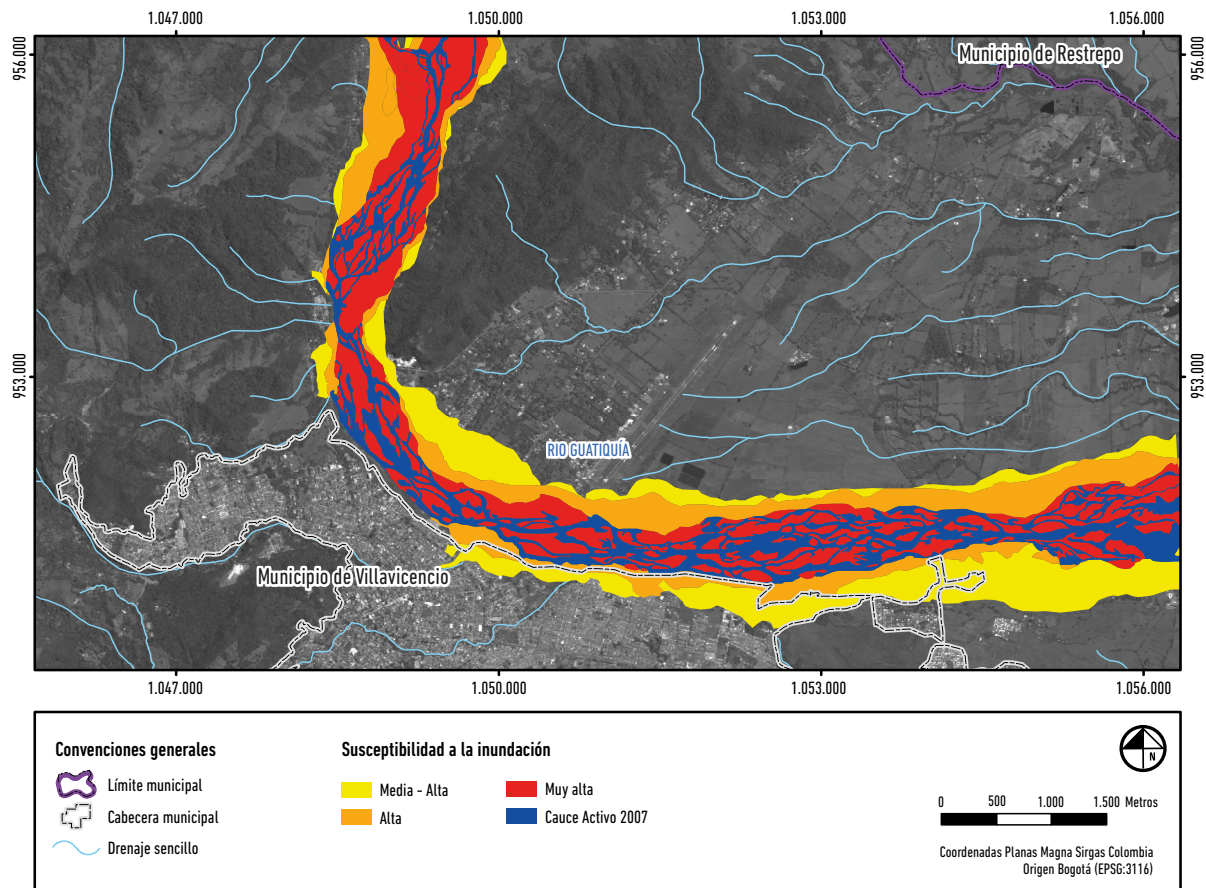


Figura 19. Zonificación de la susceptibilidad a la inundación en el río Guatiquía.

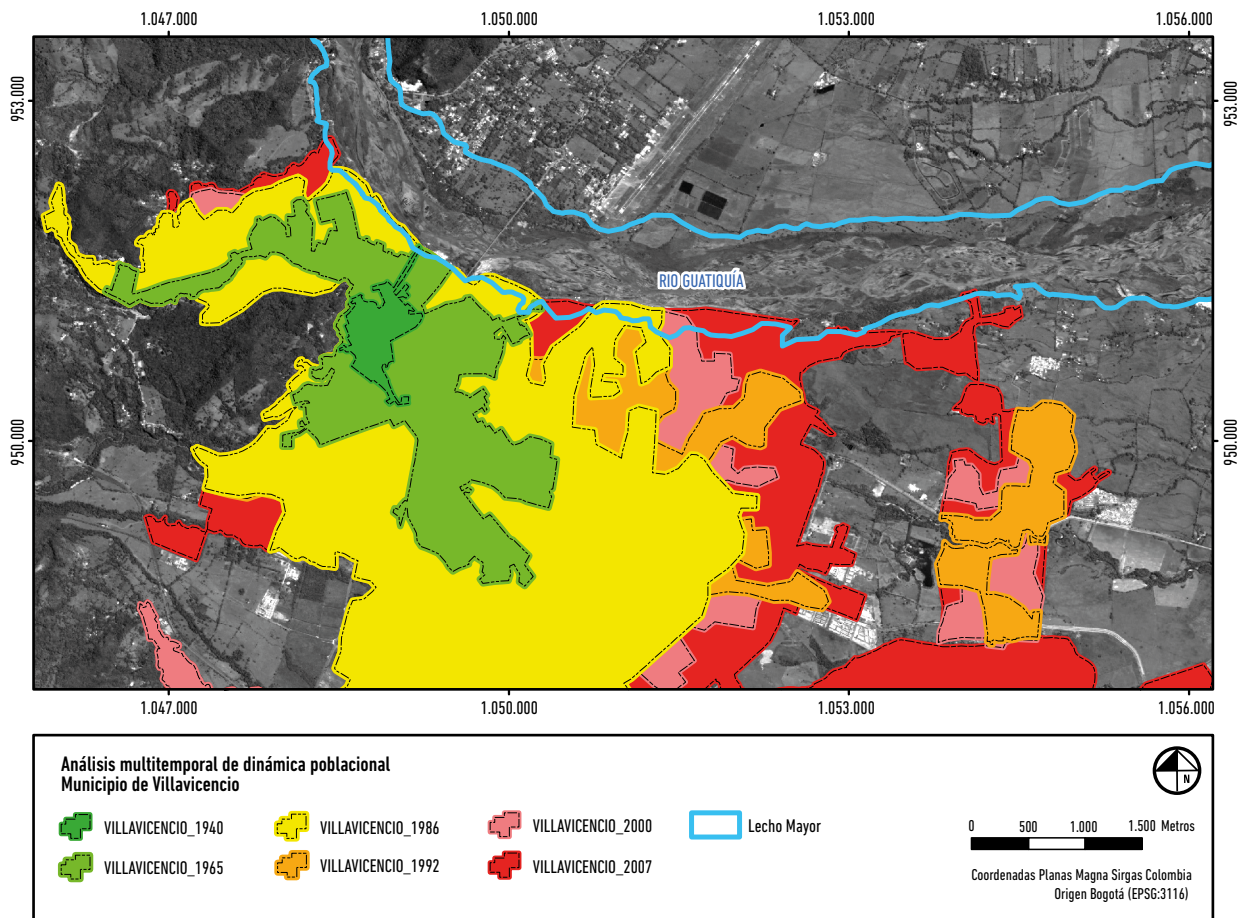


Figura 20. Dinámica de la expansión de Villavicencio y los límites de divagación del río Guatiquía (analizados desde 1940 al 2007).

del crecimiento del perímetro urbano de Villavicencio desde 1940.

En la siguiente figura se muestra cómo ha sido el cambio de la ocupación urbana del suelo en relación con el lecho mayor del río Guatiquía. De esta imagen se resalta el desarrollo del municipio (en términos de ocupación del espacio), que ha incrementado su superficie en cerca del 100% durante el periodo de análisis (figura 20).

Así mismo, se destaca que el río Guatiquía cuenta con una movilidad lateral recurrente dentro de unos límites naturales, lo que lo convierte en un cauce relativamente estable en el curso del tiempo, aunque en el futuro la sedimentación puede generar procesos de socavación lateral que afectarían directamente el perímetro urbano de Villavicencio (específicamente, el límite norte).

De la interrelación de los dos análisis multitemporales se deduce:

- Una dinámica poblacional muy alta (medida en función de la ocupación del terreno).

- Una dinámica hídrica relativamente estable (dentro de los límites naturales definidos).
- La dinámica del río Guatiquía en este tramo es controlada por rasgos fisiográficos naturales, mientras que la dinámica de la ocupación del terreno no atiende a ningún límite en su expansión.
- Este último aspecto hace que la población invada progresivamente los límites naturales de migración del río Guatiquía, con lo que se expone a fenómenos naturales recurrentes que causan pérdidas económicas y humanas.

La estimación de las áreas potencialmente afectadas indica que 64,7 ha localizadas dentro de la zona de estudio tienen una susceptibilidad media-alta de sufrir inundaciones y 17,9 ha se encuentran dentro de la unidad de susceptibilidad alta. Entre los barrios o sectores afectados por esta situación están Calamar, Hierbabuena, La Chorrera, Villa Julio, Camino Real, Topacio y Villa Suarez (figura 21).

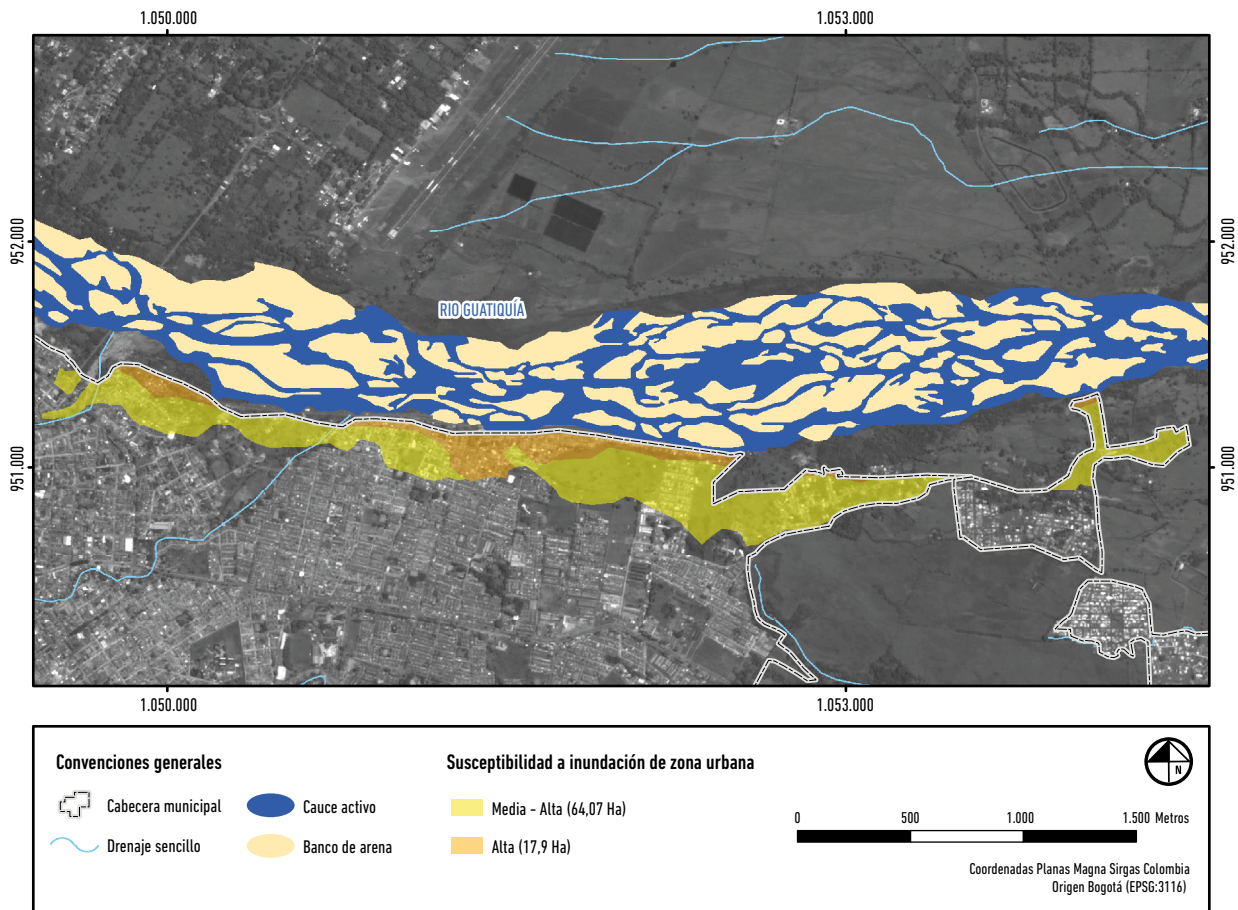


Figura 21. Condición reciente del área de cabecera municipal cubierta por susceptibilidad a inundación.

Conclusiones

Como resultado de los análisis desarrollados para la determinación de la susceptibilidad a la inundación, a continuación se consideran algunos aspectos relevantes:

- El río Guatiquía a través del tiempo ha mantenido su canal de movilidad en el lecho mayor, controlado por barreras naturales que evitan la erosión lateral.
- La dinámica en la expansión de la ciudad de Villavicencio permite asegurar que esta variable tiene un peso importante en la exposición de amplias zonas urbanas, particularmente, aquellos asentamientos en la ronda de protección del río Guatiquía.
- El escenario observado en el área de estudio se resume en una condición de afectación inducida por el crecimiento descontrolado de la ciudad ante un cauce que históricamente se ha comportado de la misma manera.

- Desde el punto de vista práctico, el estudio y la metodología propuesta podrían ser incorporados como fase preliminar en la planeación regional de áreas urbanas, particularmente, en la definición de áreas de expansión, de este modo se evitaría incurrir en gastos importantes que, debido a la dinámica del río, pierden relevancia en cada periodo de lluvias, como es el caso de los estudios batimétricos, que no permiten proyectar el comportamiento y la dinámica del río. Estos estudios serían muy importantes para el desarrollo de obras puntuales y no para la zonificación de este tipo de eventos.
- En esta investigación se evidencia que los estudios de inundaciones deben contemplar, por lo menos, un análisis del comportamiento dinámico del cauce en su lecho mayor, en un periodo no menor a 50 años.
- El comportamiento multitemporal del cauce con respecto al crecimiento urbano establece criterios confiables para la toma de decisiones en la planificación y ordenamiento urbano y territorial.

Referencias

- Aguilar, Ana María, Geovany Bedoya, y Michel Hermelin. 2008. "Inventario de los desastres de origen natural en Colombia, 1970-2006 - limitantes, tendencias y necesidades futuras." *Gestión y Ambiente* 11 (1): 109-120.
- Alcaldía de Villavicencio. 2013. "Síntesis diagnóstica POT Villavicencio marzo 25 de 2013." *Plan de Ordenamiento Territorial NORTE*. Consultado en diciembre de 2014. http://antigua.villavicencio.gov.co/index.php?option=com_docman&Itemid=209
- Armas, Paula, y María Lidia Sánchez. 2011. "Análisis estratigráfico secuencial de las formaciones Anacleto y Allen (Cretácico Tardío) en el borde nororiental de Cuenca Neuquina, Argentina." *Andean Geology* 38 (1): 119-155.
- Brice, James C. 1960. "Index for Description of Channel Braiding." *Bulletin of the Geological Society of America* 71:1833.
- Brice, James C. 1964. "Channel Patterns and Terraces of the Loup Rivers in Nebraska." *Geological Survey Professional Paper* 422-D:D1-D41.
- Castillo-López, Luis Antonio, y Germán Vargas Cuervo. 2018. "Geomorfología sísmica y elementos en ambientes fluvio lacustres en un sector de los Llanos Orientales (Colombia)." *Boletín de Ciencias de la Tierra* 43:45-52. doi: 10.15446/rbct.n43.66309.
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), e IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2005. *Geomorfología aplicada al levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras*. 2ed. Bogotá: DANE, IGAC.
- Dorado Galindo, Jorge. 1984 "Contribución al conocimiento de la estratigrafía de la formación Brechas de Buenavista (límite Jurásico-Cretácico), Región Noroeste de Villavicencio (Meta)." Tesis de grado en geología, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Egozi, Roey, y Peter Ashmore. 2008. "Defining and Measuring Braiding Intensity." *Earth Surface Processes and Landforms* 33 (14): 2121-2138. doi: 10.1002/esp.1658.
- Flórez, Antonio, y Myriam Suavita Bejarano. 1997. "Génesis y manifestación de las inundaciones en Colombia." *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 6 (1-2): 60-110.
- Ghinassi, Massimiliano, Alessandro Lelpi, Mauro Aldinucci, y Milovan Fustic. 2016. "Downstream-Migrating Fluvial Point Bars in the Rock Record." *Sedimentary Geology* 334 (1): 66-96. doi: 10.1016/j.sedgeo.2016.01.005.
- Gregory, K. J. 2004. "Fluvial Geomorphology." En *Geomorphology and Climate*, editado por A. S. Goudie, 289-398. Londres: Wiley.
- Gutiérrez Elorza, Mateo. 2009. *Geomorfología*. Madrid: Pearson.
- Henshaw, Alexander J., Angela M. Gurnell, Walter Bertoldi, y Nick A. Drake. 2013. "An Assessment of the Degree to which Landsat TM Data can Support the Assessment of Fluvial Dynamics, as Revealed by Changes in Vegetation Extent and Channel Position, Along a Large River." *Geomorphology* 202 (15): 74-85. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.01.011.
- Hernández, Jorge Armando. 2015. "Geomática en el análisis de la dinámica fluvial del río Magdalena en el tramo Neiva - Honda entre 1974 y 2011." Tesis de maestría, Universidad del Tolima, Ibagué.
- Hubach, Enrique. 1957. *Contribución a las unidades estratigráficas de Colombia*. Informe 1212. Bogotá: Instituto Geológico Nacional.
- IDEAM. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 1995-2012. *Registros climatológicos y Limnigráficos, estaciones Unillanos y Puente Abadía*. Años 1995 a 2012. Bogotá: IDEAM.
- Jahnig, Sonja C. Armin Lorenz, y Daniel Hering. 2008. "Hydromorphological Parameters Indicating Differences between Single and Multiple Channel Mountain Rivers in Germany, in Relation to their Modification and Recovery." *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 18 (87): 1200-1216. doi: 10.1002/aqc.875.
- Kiss, Tímea, y György Sipos. 2007. "Braided-Scale Channel Geometry Changes in Sand-Bedded River: Significance of Low Stages." *Geomorphology* 84 (3-4): 209-221. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.01.041.
- Leopold, Luna B., Gordon Wolman, y John P. Miller. 1964. *Fluvial Processes in Geomorphology*. New York: Dover Publications.
- Miall, Andrew. 1996. *The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary facies, Basin analysis and Petroleum Geology*. Springer
- Ministerio de Minas y Energía, e Ingeominas. 2003. *Zonificación integral por amenazas naturales para la ciudad de Villavicencio - Meta, Fase II*. Convenio Interadministrativo 012/2002. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, Ingeominas.
- Olaya Ferrero, Víctor. 2004. *Hidrología computacional y modelos digitales de terreno: teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico*. Madrid: e-book.
- Orjuela Vásquez, Jesús Alfonso. 2015. "La modelación 'Fisiconumérica' del río Magdalena." *Anales de Ingeniería: Ingeniería del Futuro* 127 (932): 86-89.
- Renzoni Giancarlo. 1965. *Geología del macizo de Quetame*. Bogotá: Servicio Geológico Nacional.
- Rodríguez S., Erasmo Alfredo, Ricardo Alfonso González P., Martha Patricia Medina N., Yuly Andrea Pardo C., y Ana Carolina Santos R. 2007. "Propuesta metodológica para

- la generación de mapas de inundación y clasificación de zonas de amenaza. Caso de estudio en la parte baja del río Las Ceibas (Neiva - Huila).” *Avances en Recursos Hidráulicos* 16:65-78.
- Romel, Carlos G. 1997. *Geomorfología de cauces aluviales*. Guía didáctica. Consultado en diciembre de 2014. <http://info-fich.unl.edu.ar/upload/494513ade4aaa90a561fa4ebba346dbb068e045f.pdf>
- Schumm, S. A. 1963. “Sinuosity of Alluvial Rivers of the Great Plains.” *Bulletin of the Geological Society of America* 74 (9): 1089-1100.
- Segovia, Antonio. 1965. *Geología del cuadrángulo L-12 Medina. Escala 1:200 000*. Bogotá: Ingeominas.
- Serrato Álvarez, Pedro Karin. 2010. *Estudio de la dinámica fluvial del río La Miel, aguas abajo de la central hidroeléctrica Miel I*. Bogotá: IGAC.
- SGC (Servicio Geológico Colombiano). 2008. *Geología y memorias de la plancha 266*. Consultado en enero de 2015. <https://www.sgc.gov.co/>
- Singh, Vijay P. 2012. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Colorado: Water Resources Publications, LLC.
- Spot Image. 2007. *Imagen Satelital Spot resolución espacial 6-12m*. Formato Geotiff.
- Texeira, Willson, Thomas Rich Fairchild, María Cristina Motta de Toledo, y Fabio Taioli. 2000. *Decifrando a Terra*. Sao Paulo: Companhia Editora Nacional.
- Trefethen, J. 1987. *Geología para ingenieros*. Traducido por José Luis de La Loma. México: Continental S. A.
- USGS (Science for a Changing World). 2018. “Welcome to Glo-Vis.” Consultado en enero de 2015. <http://glovis.usgs.gov/>
- Van Zuidam, Robert A. 1985. *Aerial Photo-Interpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic Mapping*. Países Bajos: Smith.
- Vargas Cuervo, Germán. 1998a. “La teledección en la observación, estudio y monitoreo de la tierra.” *Innovación y Ciencia* XV (3): 106-118.
- Vargas Cuervo, Germán. 1998b. *Datos básicos y experiencias del proyecto río Guatiquía: Proyecto manejo de recursos naturales de la Cuenca Alta del río Guatiquía*. Villavicencio: Secretaría del Medio Ambiente de Villavicencio (SEMA), Convenio Colombo-Alemania GTZ.
- Vargas Cuervo, Germán. 2008a. “Geología y geomorfología aplicada a los ríos.” En *Río Magdalena, navegación marítima y fluvial (1986-2008)*, editado por Manuel Alvarado Ortega y Roberto Castro Escobar, 183-214. Barranquilla: Uninorte.
- Vargas Cuervo, Germán. 2008b. “Caracterización hidráulica, sedimentología y geomorfología del río Magdalena entre el Puente Pumarejo (K22) y Bocas de Ceniza (Ko).” En *Río Magdalena, navegación marítima y fluvial (1986-2008)*, editado por Manuel Alvarado Ortega y Roberto Castro Escobar, 56-113. Barranquilla: Uninorte.
- Vargas Cuervo, Germán. 2009. “Dinámica de cuerpos de agua y zonas inundables.” En *Río Magdalena, navegación marítima y fluvial (1986-2008)*, 183-215. Barranquilla: Universidad del Norte. Consultado en enero de 2015. [http://yland-yland.uninorte.edu.co/río magdalena](http://yland-yland.uninorte.edu.co/río%20magdalena)
- Vargas Cuervo, Germán. 2012. “Geología, geomorfología y dinámica fluvial aplicada a hidráulica de ríos.” Conferencia presentada en el *XX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, Barranquilla, Colombia, 8 al 10 de agosto.
- Vargas Cuervo, Germán. 2015. *Guía y catálogo de unidades geomorfológicas en Colombia por Sensores Remotos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Vargas Cuervo, Germán. 2016. “Determination of the Relative Sediment Concentration in Water Bodies Using Remote Sensing Methodology.” *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 26 (1): 11-24. doi: 10.15446/rcdg.v26n1.56021.
- Vargas Cuervo, Germán. 2018. *Geología y geomorfología de ríos tropicales: conocer los ríos previene desastres*. Bogotá: en edición.

Lecturas recomendadas

- Aguirre Montoya, Fernán Mauricio. 1992. *Componente geológico y zonificación de amenazas por inundaciones y deslizamientos: subcuenca río Molino-Pubus. Municipio de Popayán, Departamento del Cauca*. Consultado en diciembre de 2014. <http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/POMCH/Rio%20Molino-Pubus/Informe%20Final.pdf>
- Barillas-Cruz, Manolo, Cees van Westen, Elfego Orozco, Ivo Thonon, Estuardo Lira, Graciela Peters Guarín, y Pedro Tax. 2003. “Zonificación de amenazas naturales en la cuenca del río Samalá y análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián Retalhuleu.” *GEOS* 23 (1): 17-24.
- Díez Herrero, Andrés. 2001. “Geomorfología e hidrología fluvial del río Alberche: modelos y S.I.G. para la gestión de riberas.” Tesis de doctorado en geología, Universidad Complutense de Madrid, España.

Sandra Dudei Varón Gutiérrez

Ingeniera forestal, y especialista en Sistemas de Información Geográfica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá) y especialista en Análisis Espacial de la Universidad Nacional de Colombia (Sede Bogotá). Actualmente desarrolla su tesis de Maestría en Geografía en esta misma universidad. Se desempeña como contratista de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Sus intereses investigativos son la cartografía temática y el ordenamiento territorial.

Germán Vargas Cuervo

Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia (Sede Bogotá), doctor en Ciencias de la Tierra de la Université Pierre et Marie Curie Paris VI (Francia). Ha trabajado en varias instituciones públicas como el Servicio Geológico Colombiano (1987-1998), el IDEAM (1998-2000), el Ministerio de Minas y Energía (2011) y, actualmente, se desempeña como profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia y como coordinador del grupo de investigación de Geotecnologías (categoría A en Colciencias).