

CONVENIO INTERADMINISTRATIVO N° 0205 DE 2017

CVC – UNIVALLE

MUNICIPIOS DE BOLÍVAR, ROLDANILLO Y VERSALLES



Sistemas de Información Geográfica -SIG- para la zonificación de amenaza por inundación
Municipio de Bolívar

INFORME TÉCNICO



Santiago de Cali, octubre de 2018



CONVENIO INTERADMINISTRATIVO N°0205
CVC – UNIVALLE
MUNICIPIOS DE BOLIVAR, ROLDANILLO Y VERSALLES



PRESENTACIÓN

Para la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC, es una gran satisfacción aportar a los municipios de Bolívar, Roldanillo y Versalles, la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y escenarios de afectación o daño en el componente urbano municipal, en cumplimiento de la función dada por la Ley 1523 de 2012 sobre el apoyo a los municipios en el conocimiento del riesgo.

Conocedores de la importancia y responsabilidad que reviste abordar el tema del conocimiento de las amenazas y los riesgos, la CVC llevó a cabo una alianza con el Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente, OSSO, adscrito a la Universidad del Valle, con el fin de obtener los mejores resultados en estas evaluaciones. De igual forma, es necesario reconocer el aporte, contribución y compromiso de las administraciones municipales y sus propios habitantes, a lo largo de la ejecución de este estudio. Otro objetivo es fortalecer el conocimiento que tenemos de nuestro entorno para tener certeza y articular una adecuada planificación y ocupación de nuestros territorios.

Los estudios entregados son parte fundamental de la información que se requiere para que cada municipio formule su Ordenamiento Territorial de segunda generación y son evaluaciones que dan soporte para la reducción y la elaboración de planes de emergencia y contingencia.

La presente evaluación de las amenazas y riesgos deben estructuralmente permitirle al municipio reglamentar el uso del suelo en el componente urbano, de tal manera que, como lo define la política de gestión del riesgo y en esencia la constitución colombiana, se logre avanzar hacia un desarrollo sostenible, que ofrezca seguridad para la vida de los habitantes, sus bienes y medios de subsistencia, así como a toda la infraestructura del municipio.

Finalmente, la CVC con estas evaluaciones, a través de la Universidad, espera contribuir en la formación y fortalecimiento de la capacidad profesional de la región en este tipo de estudios.

Rubén Darío Materon Muñoz
Director General
CVC

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y la Dirección Ambiental Regional BRUT, a la Secretaria de Planeación e infraestructura física de la Administración Municipal por la información suministrada. De igual manera se agradece al Instituto Geográfico Agustín Codazzi por la liberación de la información catastral que fue de gran utilidad en el estudio, a Gases de Occidente S.A por la información suministrada y todas las entidades que de una u otra manera puso a disposición la información necesaria para adelantar los estudios de inundación de la zona urbana del municipio de Bolívar en el marco del Convenio Interadministrativo N°0205 de 2017 entre la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC y La Universidad de Valle, el cual tiene como objeto *“Aunar Esfuerzos Técnicos y Recursos Económicos para la Elaboración de los Estudios de Zonificación de Amenaza y Vulnerabilidad y Escenarios de Afectación para las Áreas Urbanas de los Municipios de Bolívar, Versalles y Roldanillo en el Valle del Cauca”*.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – CVC

DIRECTIVOS

RUBÉN DARÍO MATERÓN MUÑOZ

Director General

MARÍA CRISTINA VALENCIA RODRÍGUEZ

Secretaria General (C)

HÉCTOR FABIO ARISTIZABAL RODRIGUEZ

Director Técnico Ambiental (C)

PAULA ANDREA SOTO QUINTERO

Directora Territorial – Dirección Ambiental Regional BRUT

SUPERVISIÓN

YUNCELY GIMENA BASTIDAS B

Ingeniería Civil

Especialista en Diseño Estructural

Líder del proyecto 5001

ARELIX ANDREA ORDOÑEZ FRANCO

Ingeniería Ambiental

Supervisora del Convenio Interadministrativo N° 0205 de 2017 CVC-Univalle

EQUIPO TÉCNICO

OMAR ALBERTO CHAVES M

Ingeniero Civil

ALEJANDRA MARÍA GÓMEZ

Ingeniera Civil

Doctora (Ph. D.) en Geotecnia

MARÍA VICTORIA CROSS GARCÉS

Ingeniera Agrónoma

Especialización en Educación Ambiental

UNIVERSIDAD DEL VALLE

DIRECTIVOS

EDAGAR VARELA BARRIOS

Rector

LILIANA ARIAS CASTILLO

Vicerrectora Académica

INÉS MARÍA ULLOA VILLEGAS

Vicerrectora Administrativa

CLAUDIA SANTAMARÍA GAITÁN

Vicerrector de Bienestar Universitario

JAIME RICARDO CANTERA KINTZ

Vicerrector de Investigación

ANTONIO JOSÉ ECHEVERRY PÉREZ

Secretario General

GLADYS STELLA LÓPEZ JIMÉNEZ

Decana - Facultad de Humanidades

EQUIPO TÉCNICO

ELKIN DE JESÚS SALCEDO HURTADO

Director - Observatorio Sismológico y Geofísico del Sur Occidente Colombiano - OSSO

Doctor (Ph. D.) en Física-Matemáticas

GRUPO DE CARTOGRAFÍA Y SIG

Jhon Jairo Barona

Doctor en Ing Geográfica

Coordinador

Danny Alexander Cocuñame Ricardo

Geógrafo

Vanessa García Cardona

Ing. Topográfica

Carlos Mauricio Mosquera Pérez

Est. Ingeniería Topográfica

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
1. ANÁLISIS DE LOS REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN ESPACIAL DE LA METODOLOGÍA.....	12
1.1. LISTADO DE INSUMOS O DATOS DE ENTRADA	12
1.2. LISTADO DE ESPECIFICACIONES PARA LOS INSUMOS.....	12
2. PLANTEAMIENTO DE PROCEDIMIENTOS PARA LA OBTENCIÓN DE PRODUCTOS SU TRATAMIENTO MEDIANTE HERRAMIENTAS DE SIG.....	13
2.1. OPERACIONES DE DIGITALIZACIÓN	14
2.1.1. OPERACIONES ENTRE MAPAS	14
2.1.2. CLASIFICACIÓN DE VARIABLES	15
2.1.3. INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN	16
2.1.4. ANÁLISIS ESPACIAL	16
3. DESARROLLO DE PRODUCTOS	22
3.1. CARTOGRAFÍA BASE DIGITAL DEL ÁREA DE ESTUDIO	22
3.2. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL	24
3.3. INVENTARIO Y ESPACIALIZACIÓN DE EVENTOS DE INUNDACIÓN.....	24
3.4. CARTOGRAFÍA TEMÁTICA	29
3.4.1. HIDROLOGÍA.....	29
3.4.2. GEOLOGÍA	31
3.4.3. FORMACIONES SUPERFICIALES	32
3.4.4. GEOMORFOLOGÍA	34
3.5. AMENAZA POR INUNDACIÓN	35
3.6. VULNERABILIDAD.....	41
3.6.1. INUNDACIÓN.....	41
3.7. ÁREAS DE AFECTACIÓN.....	45
3.7.1. INUNDACIÓN.....	45
CONCLUSIONES	49
REFERENCIAS	50

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.1. ESCALA DE TRABAJO.....	12
TABLA 3.1. PORCENTAJE DE ÁREAS A PARTIR DE LOS GRADOS DE VULNERABILIDAD CORPORAL ...	41
TABLA 3.2. PORCENTAJE DE ÁREAS A PARTIR DE LOS GRADOS DE VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL	42
TABLA 3.3. PORCENTAJE DE PREDIOS A PARTIR DE LOS GRADOS DE VULNERABILIDAD CORPORAL	42
TABLA 3.4. PORCENTAJE DE PREDIOS A PARTIR DE LOS GRADOS DE VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL	42
TABLA 3.5. PORCENTAJE DE ÁREAS A PARTIR DE LOS GRADOS DE AFECTACIÓN.....	46
TABLA 3.6. PORCENTAJE DE PREDIOS A PARTIR DE LOS GRADOS DE AFECTACIÓN	46

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. CLASIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS	13
FIGURA 2.2. SUMATORIA CAPAS	14
FIGURA 2.3. UNIÓN CAPAS	15
FIGURA 2.4. INTERSECCIÓN	15
FIGURA 2.5. RECLASIFICACIÓN.....	15
FIGURA 2.6. AGRUPACIÓN.....	16
FIGURA 2.7. FUNCIÓN DE DENSIDAD KERNEL A DIFERENTES ANCHOS DE BANDA	17
FIGURA 2.8. CLASIFICACIÓN DENSIDAD DE KERNEL.....	19
FIGURA 2.9. DISTANCIA EUCLIDIANA	20
FIGURA 2.10. INTERPOLACIÓN.....	21
FIGURA 2.11. SUPERPOSICIÓN PONDERADA	22
FIGURA 3.1. MAPA DIVISIÓN POLÍTICO-ADMINISTRATIVA DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE BOLÍVAR.....	23
FIGURA 3.2. ESQUEMA METODOLÓGICO DE LA ESPACIALIZACIÓN DE LOS EVENTOS HISTÓRICOS...	24
FIGURA 3.3. MAPA DE HISTORICIDAD POR BARRIOS CON REPORTES DE EVENTOS DE INUNDACIÓN ZONA URBANA MUNICIPIO DE BOLÍVAR	25
FIGURA 3.4. EXTRACCIÓN DE COTAS EVENTOS HISTÓRICOS PUNTUALES DE INUNDACIÓN	26
FIGURA 3.5. MAPA DE HISTORICIDAD DE SECTORES POSIBLEMENTE AFECTADOS POR EVENTOS DE INUNDACIÓN SEGÚN ANÁLISIS DE LA TOPOGRAFÍA DEL TERRENO	27
FIGURA 3.6. MAPA DE CARTOGRAFÍA SOCIAL PARA LA VALIDACIÓN DE RESULTADOS DE HISTORICIDAD DE EVENTOS DE INUNDACIÓN EN LA ZONA URBANA DEL MUNICIPIO DE BOLÍVAR PERIODO 1970-2018	28
FIGURA 3.7. MAPA DE HIDROLOGÍA ZONA URBANA MUNICIPIO DE BOLÍVAR	30
FIGURA 3.8. MAPA GEOLÓGICO ZONA URBANA MUNICIPIO DE BOLÍVAR	31
FIGURA 3.9. MAPA DE FORMACIONES SUPERFICIALES ZONA URBANA DEL MUNICIPIO DE BOLÍVAR	33
FIGURA 3.10. MAPA DE ELEMENTOS GEOMORFOLÓGICOS ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE BOLÍVAR	34
FIGURA 3.11. MAPA DE PRECIPITACIONES MENSUALES MULTIANUALES MUNICIPIO DE BOLÍVAR PERIODO 1983-2017	35
FIGURA 3.12. MAPA DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 24 HORAS MUNICIPIO DE BOLÍVAR.....	36

FIGURA 3.13. MAPA DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 48 HORAS MUNICIPIO DE BOLÍVAR.....	37
FIGURA 3.14. MAPA DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 72 HORAS MUNICIPIO DE BOLÍVAR.....	38
FIGURA 3.15. MAPA DE AMENAZA POR INUNDACIÓN ÁREA URBANA MUNICIPIO DE BOLÍVAR	40
FIGURA 3.16. MAPA DE VULNERABILIDAD CORPORAL POR INUNDACIÓN ZONA URBANA DEL MUNICIPIO DE BOLÍVAR	43
FIGURA 3.17. MAPA DE VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL POR INUNDACIÓN ZONA URBANA DEL MUNICIPIO DE BOLÍVAR	44
FIGURA 3.18. MAPA DE ÁREAS DE AFECTACIÓN POR INUNDACIÓN ÁREA URBANA MUNICIPIO DE BOLÍVAR.....	47
FIGURA 3.19. MAPA DE ÁREAS DE AFECTACIÓN ALTA (MITIGABLE Y NO MITIGABLE) POR INUNDACIÓN - ÁREA URBANA MUNICIPIO DE BOLÍVAR.....	48

INTRODUCCIÓN

El presente informe es resultado del trabajo realizado por el grupo de Sistema de Información Geográficas, para el Municipio de Bolívar, en el cual se plantea una propuesta de implementación de una metodología para la evaluación de la amenaza por inundaciones en el contexto urbano del municipio de Bolívar, Valle del Cauca desde la perspectiva de la geomática, como respuesta al convenio interadministrativo 0205 de 2017 firmado entre la CVC y la Universidad del Valle, a través del Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano (OSSO). En este trabajo se describen los procesos y técnicas necesarias para la obtención de los productos GIS correspondientes a los insumos para aplicar esta metodología, en los componentes de historicidad, Geología y Geomorfología local, hidrología e hidráulica de los afluentes, los insumos para la zonificación de amenaza inundación y la zonificación de la vulnerabilidad y los escenarios de afectación o riesgo por inundación.

El informe se estructura en tres (3) capítulos:

- En el capítulo 1 se realiza el análisis de los requerimientos de insumos geomáticos dentro de esta metodología.
- En el capítulo 2 se presenta el planteamiento de los procedimientos para la obtención de productos su tratamiento mediante herramientas de SIG
- En el capítulo 3 se presenta el desarrollo de cada uno de los productos de Cartografía del área de estudio, el modelo digital de elevación, la cartografía temática, amenaza por inundación, vulnerabilidad y áreas de afectación ante inundaciones.
- Se presentan conclusiones

OBJETIVOS

- Definir los requerimientos de insumos geomáticos dentro de esta metodología.
- Definir los procedimientos a partir de sistemas de información geográfica para la implementación de la metodología.
- Realizar espacialmente la evaluación y modelamiento de la susceptibilidad por movimientos en masa e inundación a partir de la información suministrada por los equipos multidisciplinarios.
- Identificar, clasificar y espacializar los grados de amenazas presentes en el municipio por el fenómeno de inundación.
- Elaborar los mapas de amenaza por inundación en el municipio de Bolívar, considerando las lluvias como factores detonantes, a través de las operaciones espaciales mediante herramientas SIG.

1. ANÁLISIS DE LOS REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN ESPACIAL DE LA METODOLOGÍA

En el presente informe se relaciona los insumos requeridos para suministrar la información espacial de del municipio de Bolívar

1.1. LISTADO DE INSUMOS O DATOS DE ENTRADA

Es necesario contar con información básica del área de estudio que permita identificar, localizar y caracterizar las condiciones del territorio. A continuación, se presenta un listado de los insumos necesarios para la aplicación de esta metodología:

- Cartografía base en formato digital, que contenga, coordenadas en proyecciones cartesianas (N, E), referidas al sistema Magna sirgas, curvas de nivel, drenajes, red vial, infraestructura, equipamientos y asentamientos humanos.
- Modelo de elevación digital MDE
- Inventario de procesos morfodinámicos
- Fotografías aéreas del área de estudio
- Cartografía temática
 - Hidrológica
 - Geológica
 - Geomorfológica
 - Uso de suelos
 - Cobertura de la tierra
 - Pendientes
 - Textura
 - Orientación de laderas
 - Historicidad por inundación
 - Historicidad por movimientos en masa

1.2. LISTADO DE ESPECIFICACIONES PARA LOS INSUMOS

De conformidad con lo establecido en el decreto 1807 de 2014, en el cual se dictan las especificaciones técnicas nacionales para la elaboración de los estudios, la escala de trabajo mínima requerida depende de la clase de suelo del área de estudio, como se puede observar en la Tabla 1.1

Tabla 1.1.Escala de trabajo

TIPO DE ESTUDIO	CLASE DE SUELO	ESCALA
Estudio Básico	Urbano	1:5.000
	Expansión urbana	1:5.000
	Rural	1:25.000
Estudio detallado	Urbano	1:2.000
	Expansión urbana	1:2.000
	Rural	1:5.000

Fuente: Ministerio de Vivienda, ciudad y territorio, 2014

Para el caso específico de este proyecto que es un estudio detallado, se utiliza la escala 1:2000 dado que el área de estudio es de carácter urbano. Los Valores de exactitud posicional de los datos espaciales es aceptada con un error medio cuadrático menor a 60 cm para todos los productos cartográficos generados.

Los productos cartográficos que se realicen en el marco de esta metodología deben estar referidos al sistema Magna Sirgas, además se debe hacer uso de proyecciones cartesianas (N, E). El plano de proyección se define de acuerdo con el origen cartográfico que corresponda al área de estudio, según la regionalización de los parámetros de transformación del IGAC.

Para este trabajo el modelo de elevación digital de entrada debe contar con un tamaño de celda o pixel mínimo de 2 m para trabajos a escala 1:2000 o 5 m para estudios a escala 1:5000, las fotografías aéreas deben tener resoluciones mayores de 10m.

Para el mapa de formaciones superficiales, la unidad mínima cartografiable está definida por la escala de trabajo; por tanto, la UGI mínima cartografiable en mapas a escala 1:2000 será de 400 m², mientras que para mapas a escala 1:5000 será de 2500 m².

2. PLANTEAMIENTO DE PROCEDIMIENTOS PARA LA OBTENCIÓN DE PRODUCTOS SU TRATAMIENTO MEDIANTE HERRAMIENTAS DE SIG

A continuación, en la Figura 2.1 se muestran las operaciones básicas utilizadas en los procedimientos realizados para la obtención de los productos cartográficos obtenidos, a partir de estas o procedimientos compuestos por la combinación de una o más de ellas, se logran obtener los productos finalmente requeridos para la aplicación de la metodología de amenaza por inundaciones.



Figura 2.1. Clasificación de procedimientos

Fuente: elaboración propia

2.1. OPERACIONES DE DIGITALIZACIÓN

La digitalización, el proceso de crear datos en formato vectorial, sean puntos líneas o polígonos, para esta tarea se puede hacer uso de diferentes tipos de software GIS, en el caso de este trabajo se usó el software ArcGIS en su Versión 10.2.2.

Existen diversas formas de digitalización, puede hacerse a partir de convertir las entidades o datos análogos a un formato digital o creando nuevos datos de entrada, un ejemplo de esto es la espacialización de eventos, consiste en realizar captura de elementos cartográficos del terreno o de sus atributos a través de diferentes dispositivos que permiten ubicarlos espacialmente asignándole coordenadas, luego esta información puede sincronizarse a través de computadores con el uso de software especializado y convertirse en un elemento vectorial. Entre las operaciones de digitalización se encuentran también la edición de mapas, la cual consiste en verificar la cartografía básica digital existente del área de estudio y compararla con fotografías o imágenes de satélite disponibles de fechas diferentes, con el fin de completar, verificar o eliminar información que ha cambiado o es inconsistente en la cartografía.

2.1.1. OPERACIONES ENTRE MAPAS

Sumatoria, la sumatoria es una operación de tipo local aritmética, las operaciones locales dependen únicamente del valor que se encuentra en cierta localización, no depende de las celdas vecinas, este operador genera una nueva capa resultado a partir de una o más capas de entrada, la capa resultado recibe valores en función de la suma de los valores de ese mismo pixel en las capas de entrada. Esta operación se puede realizar entre archivos en formato ráster, un ejemplo de aplicación de esta operación se puede observar en la Figura 2.2.

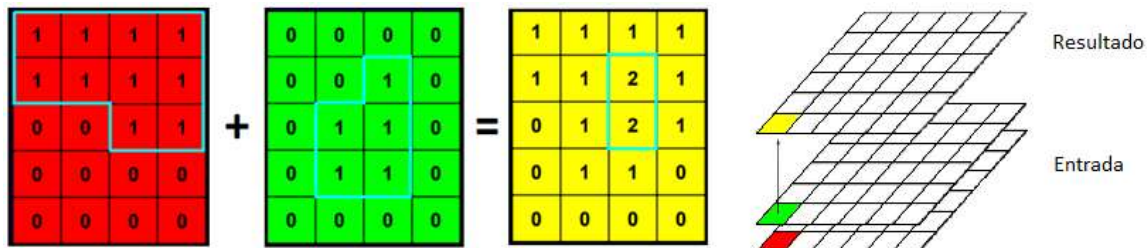


Figura 2.2. Sumatoria capas

Fuente: Modificado de Carvacho Bart, 2010

- **Unión:** este procedimiento realiza una unión geométrica de las capas de entrada, el resultado es una nueva que contiene todos los elementos de las capas de entrada, incluyendo los atributos, como se muestra en la Figura 2.3. Este procedimiento se puede hacer entre capas vectoriales, que tengan concordancia en su geometría.

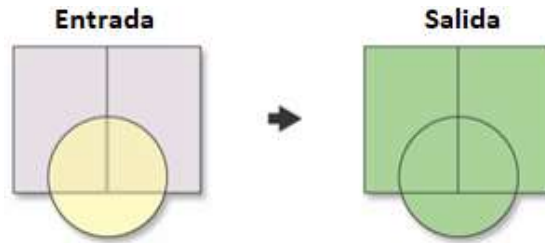


Figura 2.3. Unión capas
Fuente: ArcGIS Desktop

- **Intersección:** este procedimiento realiza una intersección geométrica entre las capas de entrada, el resultado es una nueva capa que contiene solo los elementos que se intersectan, incluyendo sus atributos, como se puede observar en la Figura 2.4. Este procedimiento se puede realizar entre capas vectoriales, sin importar su tipo de geometría.

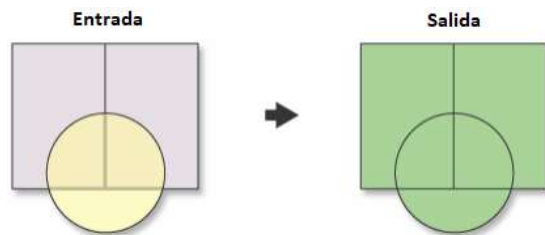


Figura 2.4. Intersección
Fuente: ArcGIS Desktop

2.1.2. Clasificación de variables

La clasificación es una operación de tipo local que se realiza a partir de una capa de entrada, consiste en asignar un valor nuevo a una celda en la capa resultado. Existen diferentes tipos de clasificación:

- **Reclasificación:** consiste en recodificar las clases de la capa de entrada, por ejemplo, para los casos de uso de suelo existen más de 20 clases, pero el experto las clasifica de 1 a 3 según el nivel de importancia para el modelo aplicado, una muestra de ello se puede observar en la Figura 2.5



Figura 2.5. Reclasificación

Fuente: Modificado de Carvacho Bart, 2010

- **La ponderación:** consiste en asignar valores de pesos a ciertas capas o variables, es decir, se asigna mayor peso a las variables que tengan más influencia en el modelo, estos pesos son dados definidos por el experto.
- **Agrupación:** esta operación consiste en agrupar los valores de una variable de tipo cuantitativa de acuerdo a unos intervalos predefinidos por el usuario o calculados automáticamente por el software, un ejemplo de agrupación se puede observar en la Figura 2.6

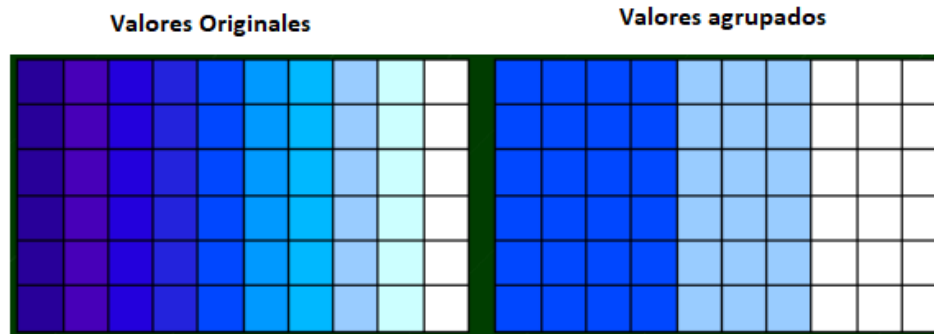


Figura 2.6. Agrupación
Fuente: Caloni, 2007

2.1.3. Integración de información

Los procedimientos de integración de información consisten en combinar información de diferentes fuentes, para generar productos cartográficos que sean requeridos, un ejemplo de esta integración es cargar la capa temática de hidrología para completar la cartografía base digital del área de estudio, o la creación de las curvas de nivel a partir del modelo digital de terreno. La integración de información puede ser de ráster –vector, de vector a ráster o vectorial-vectorial.

2.1.4. Análisis espacial

Los procedimientos de análisis espacial, permiten resolver problemas espaciales, evaluando componentes específicos de los datos de manera separada, estas técnicas permiten encontrar patrones geográficos en los datos y relaciones entre las características. La mayor parte de los análisis espaciales hacen uso de cálculos geométricos sencillos, a partir de los cuales se construyen algoritmos más complejos. A continuación se presenta la descripción de los procedimientos utilizados para la generación de los productos cartográficos de este proyecto:

- **Densidad de Kernel:** es una función de densidad que permite la visualización de patrones de concentración de densidad de eventos. La densidad de Kernel puede calcularse para las entidades de punto y de línea, el algoritmo que se usa para determinar el radio predeterminado de búsqueda, también conocido como ancho de banda, es el siguiente:
 1. Calcular el centro medio de los puntos de entrada. Si se ha seleccionado un campo población distinto de ninguno, este cálculo y los siguientes se ponderarán con los valores de ese campo.

2. Calcular la distancia desde el centro medio (ponderado) para todos los puntos.
3. Calcular la distancia media (ponderada) de esas distancias, Dm .
4. Calcular el valor de la Distancia estándar (ponderada), SD .
5. Aplicar la fórmula siguiente para calcular el ancho de banda:

$$\text{Radio de búsqueda} = 0.9 \times \min \left(SD \sqrt{\frac{1}{\ln(2)}} \times Dm \right) \times n^{-0.2} \quad (1)$$

Donde, SD es la distancia estándar, Dm es la mediana de la distancia, n es el número de puntos cuando no se usa campo de población, o la suma de los valores del campo de población cuando se utiliza. El valor \min de la ecuación expresa que se utilizará cualquiera de las dos opciones de distancia que dé como resultado el valor menor.

Por lo general, esta forma de calcular un radio predeterminado evita el fenómeno de generar "anillos alrededor de puntos" que a menudo se produce con conjuntos de datos de puntos dispersos.

- Densidad kernel para entidades de puntos, calcula la densidad de las entidades de punto de alrededor de cada celda ráster de salida. Conceptualmente, se ajusta una superficie curva uniforme sobre cada punto. El valor de superficie es más alto en la ubicación del punto y disminuye a medida que aumenta la distancia desde el punto y alcanza cero en la distancia radio de búsqueda desde el punto. Sólo es posible un vecindario circular. El volumen bajo la superficie es igual al valor Campo de población para el punto, o 1 si se especifica "ninguno" gráficamente podemos observar esto en la Figura 2.7. Para calcular la densidad de cada celda ráster de salida, se agregan los valores de todas las superficies de kernel en donde se superponen con el centro de la celda. La función se basa en la función kernel de cuarto grado que se describió en Silverman (Silverman, 1986).

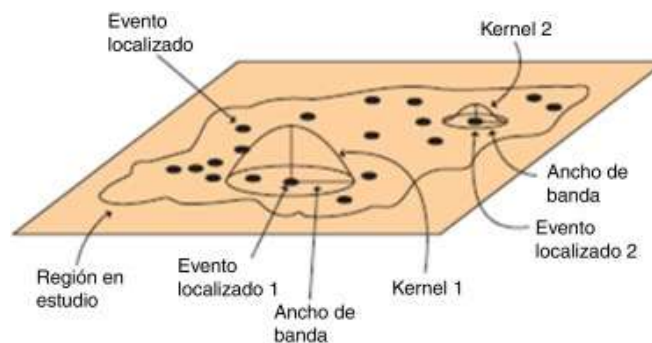


Figura 2.7. Función de densidad Kernel a diferentes anchos de banda

Fuente: Gómez, López, Llácer, Palmera, y Fernández, 2015

Si se utiliza una configuración de campo de población que no sea "ninguna", el valor de cada elemento determina la cantidad de veces que se va a contar el punto. Por ejemplo, un valor de 3 haría que el punto se cuente como tres puntos. Los valores pueden ser de tipo entero o punto flotante.

La estimación de la densidad del kernel de la función de densidad de probabilidad está basada en el método de estimación del kernel. La expresión que define la estimación de la densidad en un punto es la siguiente:

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (2)$$

Donde, x representa la serie de longitud n ; K el kernel simétrico y h el rango o parámetro de ajuste. Solo se usará el kernel Gaussiano para las estimaciones de la densidad:

$$K(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}u^2} \quad (3)$$

A partir de la expresión anterior, la densidad en un punto X se calcula como la suma de los valores del kernel para las cantidades definidas por las diferencias entre los valores del punto X y la serie. Además, los puntos X utilizados para el cálculo de la densidad pueden no coincidir con los valores de la propia serie. Estos son algunos pasos básicos en la implementación del algoritmo de estimación de la densidad del kernel.

1. Evaluación del valor medio y de la desviación estándar de la serie de entrada.
2. Normalizar la serie de entrada. Deducir la media obtenida previamente de cada valor y dividir por la desviación estándar. Después de esta normalización, la serie original tendrá una media cero y una desviación estándar igual a uno. Dicha normalización no es necesaria para calcular la densidad, pero permite unificar los gráficos resultantes, ya que para cualquier serie en la escala X habrá valores expresados en unidades de la desviación estándar.
3. Hallar valores altos y bajos en la serie normalizada.
4. Crear dos matrices cuyos tamaños correspondan al número deseado de puntos representados en el gráfico obtenido. Por ejemplo, si debe construirse el gráfico usando 200 puntos, el tamaño de las matrices debe ser de 200 valores cada una, aproximadamente.
5. Reservar una de las matrices creadas para almacenar el resultado. El segundo se utiliza para formar los valores de los puntos, para los que se ha realizado la estimación de la densidad. Para hacer esto se deben crear 200 valores (en este caso) igualmente espaciados entre los valores altos y bajos previamente preparados y guardarlos en la matriz que se ha preparado.

Una vez obtenida la densidad kernel para la nube de puntos que para el caso de este estudio representa los eventos de inundación, se obtiene un resultado similar al observado en la Figura 2.8 donde se muestran valores de densidad, se clasifican de mayor densidad a densidad nula, la densidad nula indica los sitios donde no se presentan antecedentes del evento estudiado y la densidad alta da una idea inicial de las zonas susceptibles a dicha amenaza. Posteriormente estas zonas preliminares se pueden convertir a polígonos para un tratamiento vectorial posterior si se desea.



Figura 2.8. Clasificación densidad de Kernel

Fuente: Hernández , Azañedo, Bendezú Quispe, Pacheco Mendoza y Martín Chaparro, 2016

- **Cálculo de pendientes:** la pendiente refleja la variación máxima de la elevación y se define en función del gradiente como,

$$s = \arctan(|\nabla \bar{z}|) \quad (4)$$

En un ráster la pendiente está definida como la tasa máxima de cambio del valor de esa celda a sus vecinas. Básicamente, el cambio máximo en la elevación sobre la distancia entre la celda y sus ocho vecinas, identifica el descenso cuesta abajo más empinado desde la celda. El algoritmo básico utilizado para calcular la pendiente es:

$$pendiente_{radianes} = \arctan \left(\sqrt{\left[\frac{dz}{dx} \right]^2 + \left[\frac{dz}{dy} \right]^2} \right) \quad (5)$$

Este valor representa el ángulo entre el plano horizontal y el tangencial a la superficie en el punto considerado. Este último queda definido por el gradiente, que es normal al mismo. El horizontal es, a su vez, normal a la curva de nivel que pasa por el punto. La pendiente obtenida de la expresión anterior viene expresada en unidades de grados para la ecuación 4, y de radianes para la ecuación 5, en el software la pendiente en unidades angulares se calcula con el algoritmo,

$$pendiente_{grados} = \arctan \left(\sqrt{\left[\frac{dz}{dx} \right]^2 + \left[\frac{dz}{dy} \right]^2} \right) \times 57.29578 \quad (6)$$

El valor 57,29578 que se muestra en la ecuación 6, es una versión truncada del resultado de $180/\pi$. También es habitual dar los valores de pendiente en porcentaje. Para ello, utilizamos la expresión.

$$s = \tan(s) \times 100 \quad (7)$$

Distancia euclidiana, el cálculo de una distancia Euclidiana se realiza a partir del conocimiento de las coordenadas geográficas de los elementos o píxeles, la Figura 2.9 muestra un ejemplo gráfico

del cálculo de la distancia Euclidiana, la ecuación 8, muestra la fórmula aplicada para este procedimiento. Este es un operador de gran importancia, de una forma u otra este concepto aparece en gran multitud de procedimientos analíticos.

$$D_{1,2} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (8)$$

Orientación de laderas, junto con la pendiente, la orientación es el otro parámetro básico que calculamos a partir del gradiente. La Orientación identifica la dirección de la pendiente descendente de la tasa de cambio máxima en un valor desde cada celda hacia sus vecinas. El algoritmo para cálculo de la pendiente está definido como,

$$\text{orientación} = 57.29578 \times \text{atan2} \left(\left[\frac{dz}{dx} \right], - \left[\frac{dz}{dx} \right] \right) \quad (9)$$

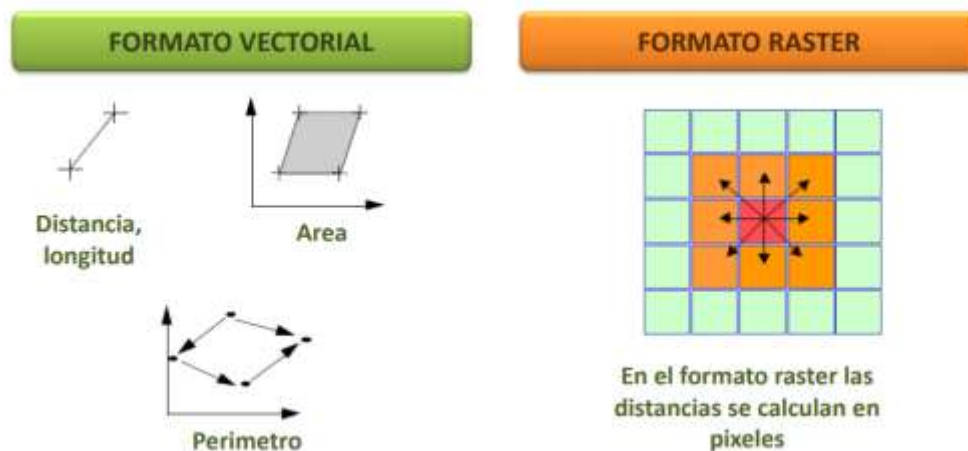


Figura 2.9. Distancia Euclidiana
Fuente: Olaya, 2014

Los valores de cada celda del ráster de salida indican la dirección de brújula a la que apunta la superficie en esa ubicación. Se mide en el sentido de las agujas del reloj en grados de 0 (hacia el norte) a 360 (hacia el norte, nuevamente), formando un círculo completo. Las áreas planas que no tienen dirección de pendiente descendente tienen un valor de -1. El algoritmo convierte a valores de dirección de brújula (0 a 360 grados), de acuerdo a las siguientes reglas:

si, $\text{orientación} < 0$ $\text{celda} = 90 - \text{orientación}$
 si, $\text{orientación} > 90$ $\text{celda} = 360 - \text{orientación} + 90$
 de otra manera, $\text{cel} = 90 - \text{orientación}$

El resultado es un ráster donde el valor de cada celda indica la dirección a la que apunta la pendiente de la celda.

Extracción de información, la operación de extracción extrae los valores contenidos en las celdas según una consulta lógica, existen diferentes variaciones de del procedimiento de extracción según la geometría de la consulta de entrada, los utilizados para el desarrollo de los productos

cartográficos requeridos son, extracción por puntos, extracción por polígonos, extracción por mascararas.

Interpolación, un método de interpolación permite el cálculo de valores en puntos no muestreados, es decir se puede crear una superficie continua a partir de una predicción realizada a partir de los valores recogidos o muestreados, un ejemplo gráfico de interpolación se puede observar en la Figura 2.10.

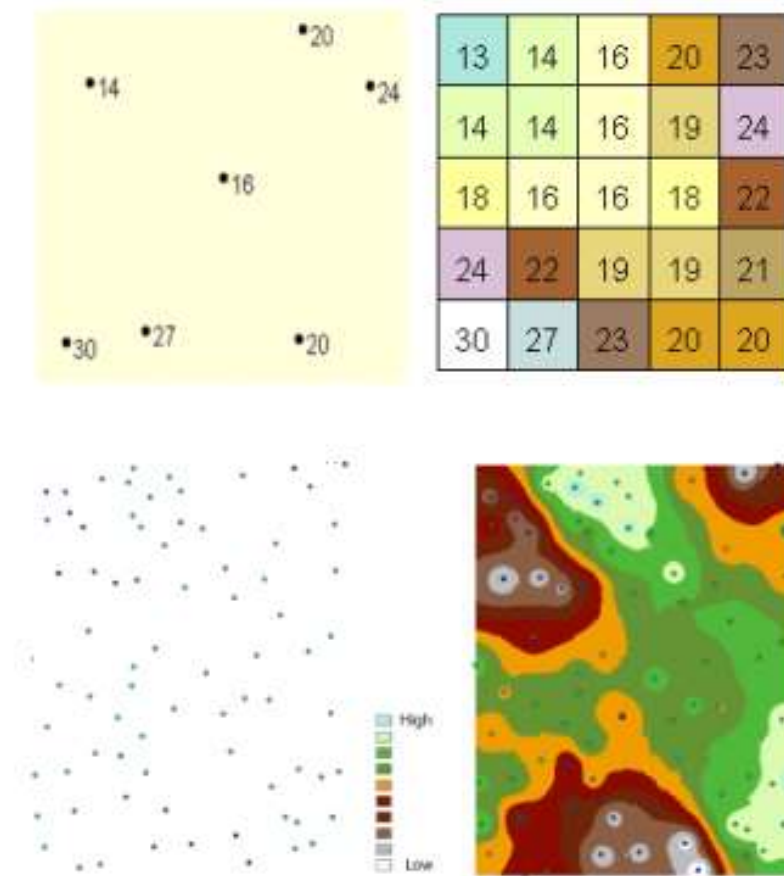


Figura 2.10. Interpolación
Fuente: www.ingemmet.gob.pe

Las herramientas de interpolación se dividen en dos, los métodos determinísticos y de estadísticas geográficas. Los métodos determinísticos de interpolación asignan valores a las ubicaciones basándose en los valores medidos circundantes y en fórmulas matemáticas específicas que determinan la suavidad de la superficie resultante. Los métodos determinísticos incluyen IDW (ponderación de distancia inversa), Vecino natural, Tendencia y Spline. Los métodos de estadísticas geográficas están basados en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación (la relación estadística entre los puntos medidos). Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no sólo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción sino que también proporcionan alguna medida de certeza o exactitud de las predicciones. Kriging es un método de interpolación de estadísticas geográficas.

Superposición ponderada, esta herramienta superpone numerosos ráster con una escala de medición común y pondera cada uno según su importancia, un ejemplo grafico de esta operación puede observarse en la Figura 2.11.

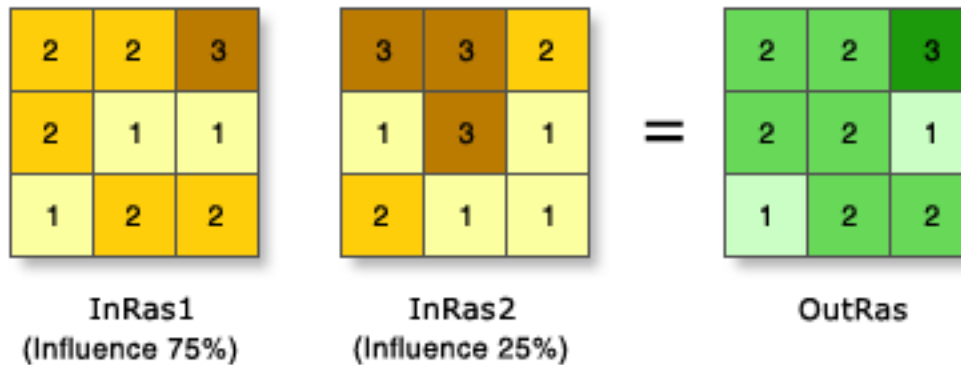


Figura 2.11. Superposición ponderada
Fuente: ArcGIS Desktop

3. DESARROLLO DE PRODUCTOS

A continuación, se describen los productos cartográficos obtenidos aplicando los diferentes procedimientos descritos, para el desarrollo de estos se realiza un procedimiento simple o un procedimiento compuesto, es decir una combinación de varios procedimientos, esto según los requerimientos del mismo.

3.1. CARTOGRAFÍA BASE DIGITAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cartografía base digital del área de estudio, es un producto cartográfico fundamental para la aplicación de las diferentes metodologías tanto de amenaza por inundación como de susceptibilidad por movimientos en masa, para la elaboración de este producto, se contó inicialmente con una base de datos geográfica brindada por la Corporación Autónoma Regional el Valle del Cauca CVC, las capas que conforman esta base de datos tienen coordenadas en proyecciones cartesianas (N, E), referidas al sistema Magna sirgas origen Oeste, en ella se encuentran los drenajes principales, red vial, distribución de los barrios, equipamientos e información predial.

Para la elaboración de este producto cartográfico, fue necesario usar un procedimiento compuesto, donde se usan operaciones de digitalización e integración de información. Los procedimientos de integración fueron de tipo ráster – vectorial, donde se complementó y se ajustó la información de drenajes a partir de ortofotos brindadas por la CVC, en algunos casos fue necesario realizar procedimientos de digitalización con este mismo objetivo, la información predial detallada fue descargada de la página oficial del Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, la división político administrativa fue proporcionada por la Secretaria de planeación del municipio de cada uno de los municipios, el producto final obtenido se muestra en la Figura 3.1.

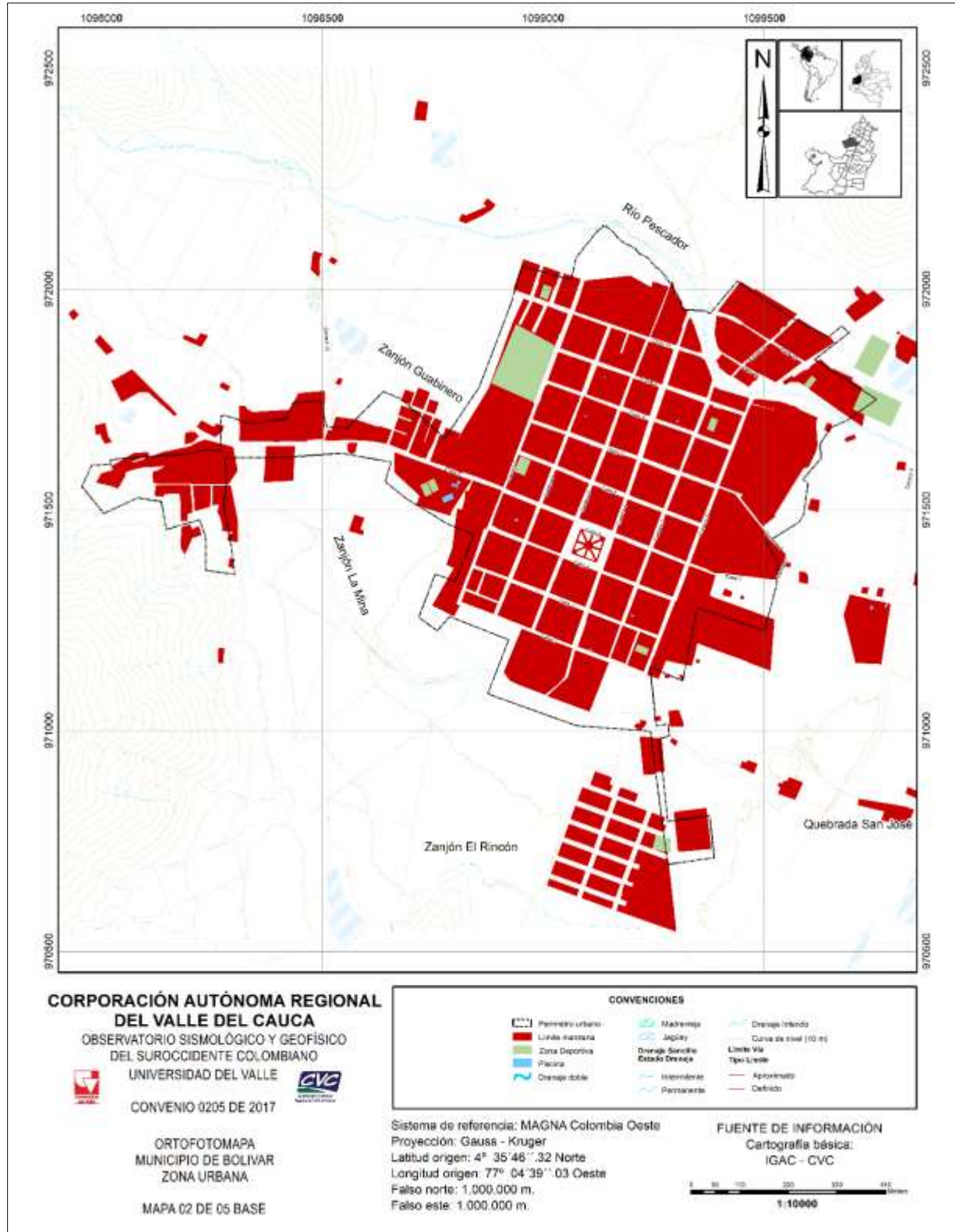


Figura 3.1. Mapa división político-administrativa del área urbana del municipio de Bolívar
Fuente: elaboración propia a partir de datos de la CVC

3.2. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL

Un modelo de elevación digital DEM, es una representación espacial matemática simplificada de la superficie de un terreno, los DEM son creados en formatos de tipo ráster donde cada una de las celdas representa un valor de altitud de la superficie del terreno.

El modelo de elevación digital proporcionado para el análisis de la topografía y formas del relieve, es un archivo de tipo ráster, generado a partir de tecnología LiDAR con una resolución espacial de 1m, que cubre el área urbana del municipio de Bolívar. Este modelo digital es un insumo importante para todos los análisis espaciales que se realizan a lo largo del proyecto.

3.3. INVENTARIO Y ESPACIALIZACIÓN DE EVENTOS DE INUNDACIÓN

Para el procesamiento de los resultados obtenidos por el equipo de historicidad del proyecto, se hizo uso de un procedimiento compuesto, el cual incluye, espacialización de eventos, clasificación, extracción de información y análisis espacial con el método de densidad de Kernel, en la Figura 3.2 se describe el flujo metodológico para la espacialización de eventos históricos.



Figura 3.2. Esquema metodológico de la espacialización de los eventos históricos

Fuente: elaboración propia

Después de realizar el procedimiento de recopilación de la información histórica de eventos de inundación y movimientos en masa, es necesario georreferenciar estos datos, lo que quiere decir que se le asigna una coordenada (x,y) que le asigna una ubicación en el espacio, para el caso específico del municipio de Bolívar solo se encontraron eventos reportados por barrios como se muestra en la Figura 3.3.

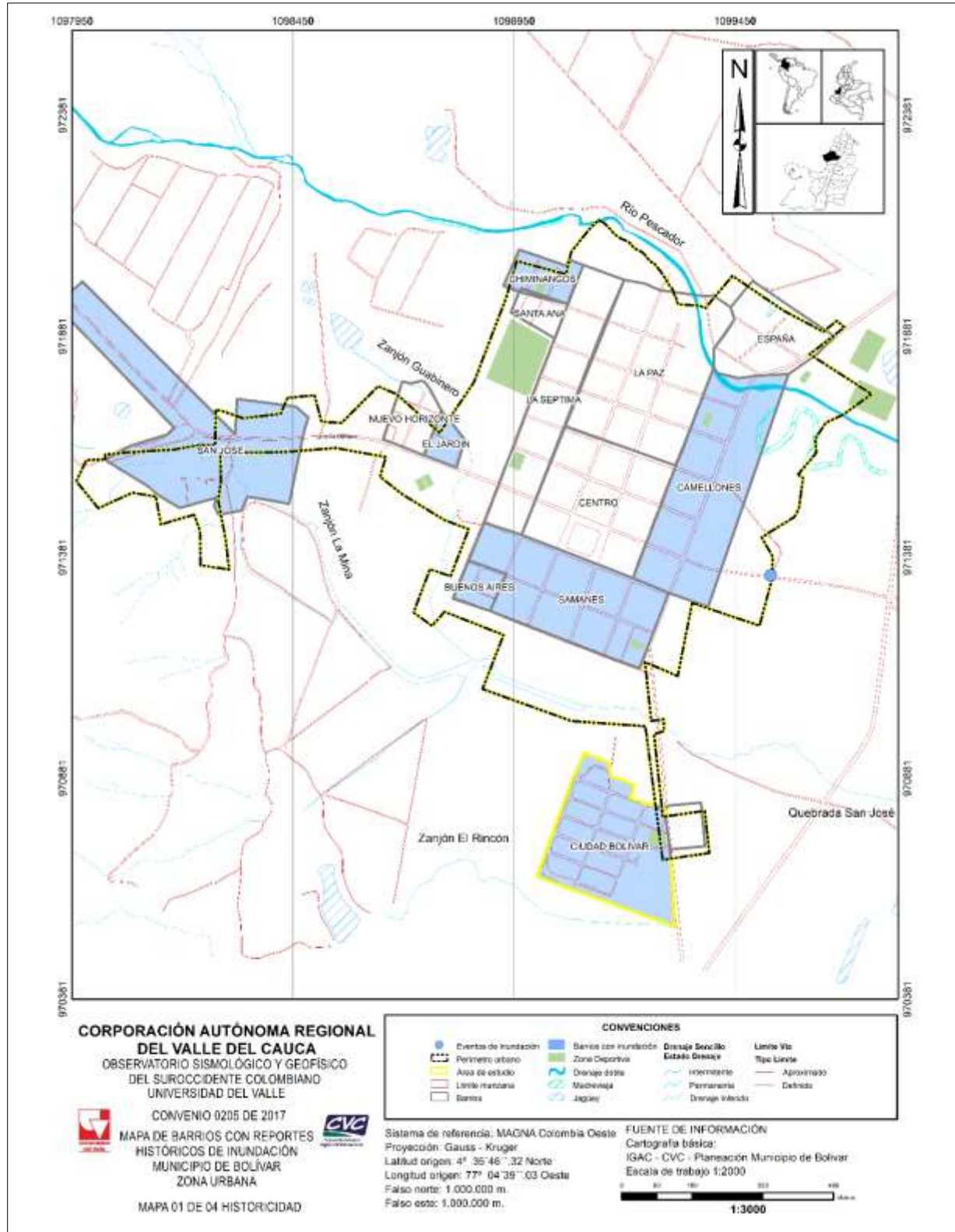


Figura 3.3. Mapa de historicidad por barrios con reportes de eventos de inundación zona urbana municipio de Bolívar

Fuente: elaboración propia

A continuación, se ejecuta un procedimiento de análisis espacial de la superficie del terreno, con el fin de sesgar la información que se reporta por barrio, basado en la hipótesis de que es poco probable que un barrio se inunde completamente, con base en ello, se realiza un proceso de extracción de información de alturas o cotas por barrio a partir del DEM, como se muestra en la Figura 3.4 de aquí se obtienen los valores máximos y mínimos de elevación para cada una de las áreas, en este procedimiento, es importante tener en cuenta, los cuerpos de agua más cercanos a los barrios y definir el rango de cotas de inundación que se presentan, ya sea basados en el sector o en los cuerpos de agua cercanos.

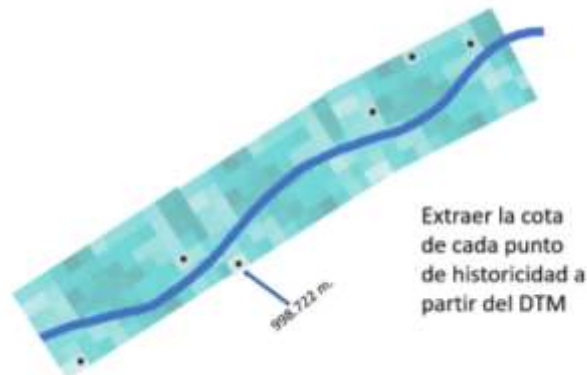


Figura 3.4. Extracción de cotas eventos históricos puntuales de inundación

Fuente: elaboración propia

Una vez definidos los rangos de cotas históricas de inundación, según sea el caso por zona o por cuerpo de agua, se obtiene a partir del DEM los píxeles que se encuentren por debajo de la cota mínima de este rango. Esto, da como resultado la selección de un conjunto de píxeles que se interceptan con las áreas de barrios identificados en la información histórica como inundables, al realizar este proceso se reducen las áreas de los barrios de acuerdo a criterios de la topografía del terreno, lo que finalmente muestra las áreas dentro de los barrios con mayor susceptibilidad de ocurrencia de inundación según eventos históricos. Este resultado se puede observar en la Figura 3.5, donde las áreas en color rojo representan áreas con susceptibilidad alta ante eventos de inundación según la historicidad, estas áreas esta localizadas topográficamente en las cotas mínimas para cada uno de los barrios, las áreas en amarillo son zonas que tiene una susceptibilidad media, estos sectores podrían ser afectadas en caso de eventos de mayor intensidad, las áreas en color verde, tienen una baja susceptibilidad a eventos de inundación según la historicidad y las área con color blanco tienen susceptibilidad nula según historicidad por eventos de inundación. Estas áreas obtenidas, se deben analizar para su adición parcial o total a las áreas obtenidas por la función de densidad.

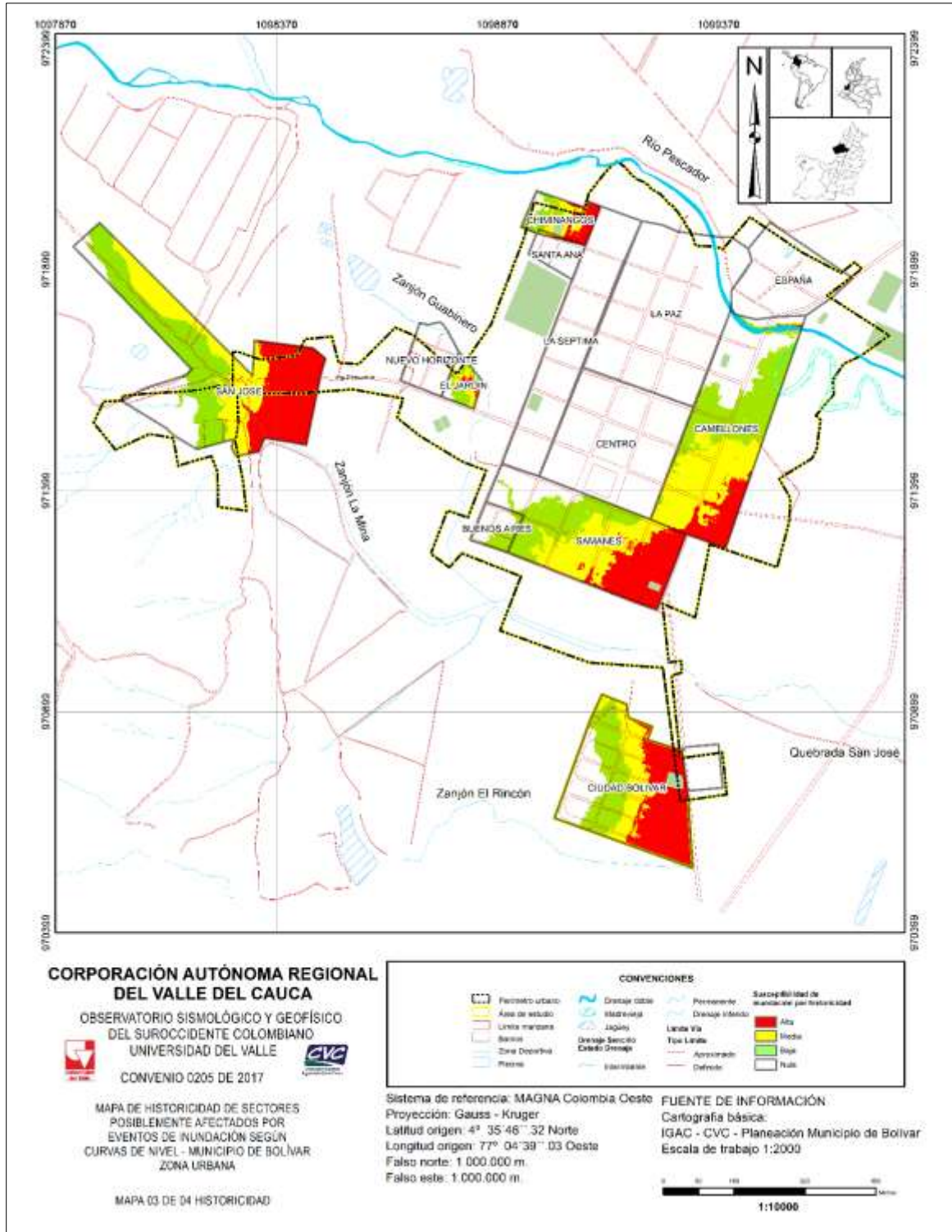


Figura 3.5. Mapa de historicidad de sectores posiblemente afectados por eventos de inundación según análisis de la topografía del terreno

Fuente: elaboración propia

Los resultados obtenidos por esta metodología fueron socializados y validados con delegados de la Administración municipal, el Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastre del municipio y la comunidad en un taller, donde se logró identificar y corroborar que los resultados obtenidos por la metodología planteada son coherentes con las zonas donde históricamente se han presentado afectaciones por inundaciones en el área urbana del municipio. Una vez realizada la socialización se realizó el producto cartográfico que se muestra en la Figura 3.6, en el cual se muestran las zonas donde se presenta inundación según la percepción de la comunidad.

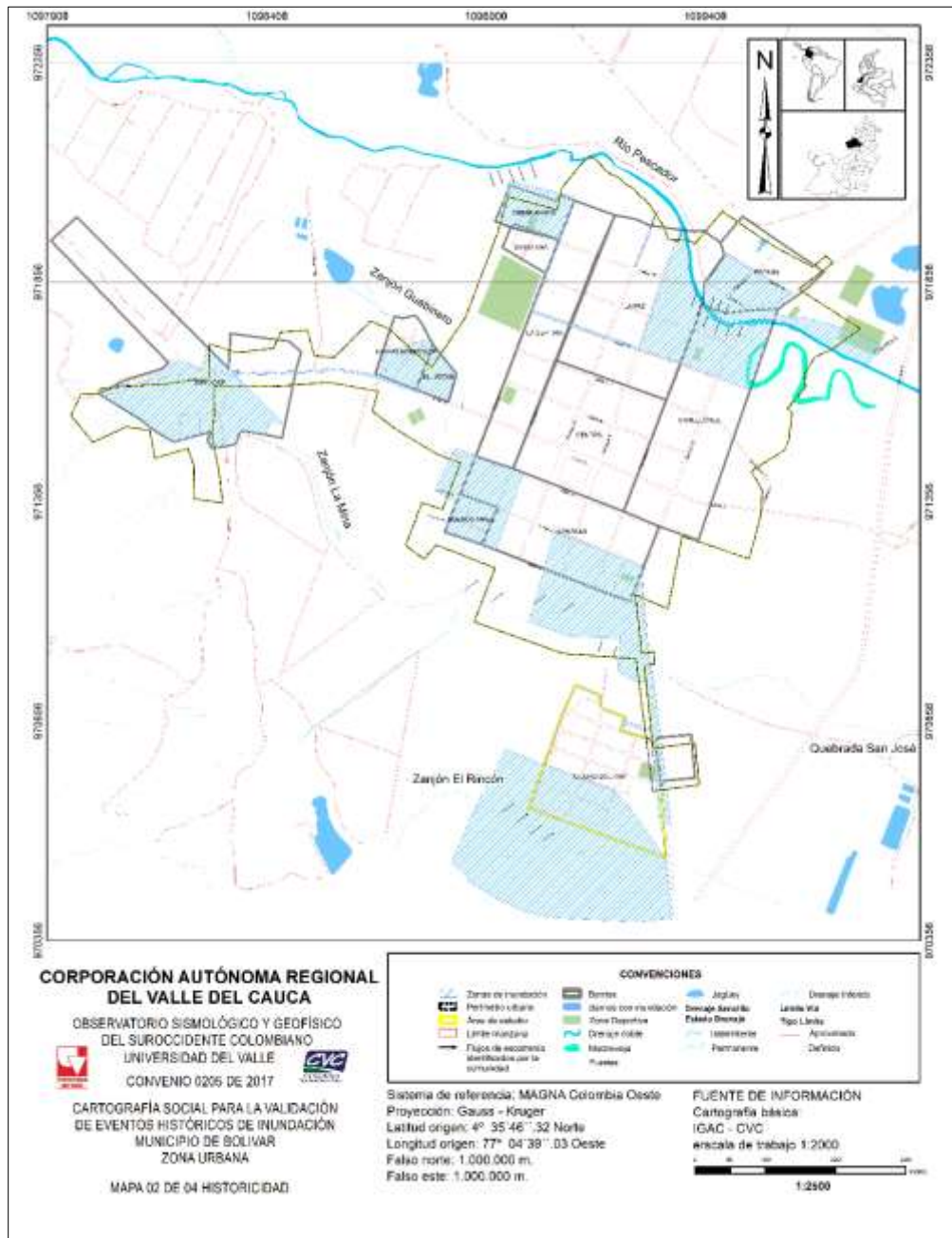


Figura 3.6. Mapa de cartografía social para la validación de resultados de historicidad de eventos de inundación en la zona urbana del municipio de Bolívar periodo 1970-2018

Fuente: elaboración propia

3.4. CARTOGRAFÍA TEMÁTICA

A continuación, se describen los productos de cartografía temática necesarios en el desarrollo de la metodología de determinación de la susceptibilidad por movimientos en masa y amenaza por inundación y se mencionan los procedimientos utilizados para la generación de cada uno de estos.

3.4.1. Hidrología

La cartografía hidrológica de la zona urbana del municipio de Bolívar, se construyó a partir de la base de datos brindada por la CVC, para ello se realizó un procedimiento compuesto que combinó procesos de integración y edición de la información.

El procedimiento de integración se realizó a partir de las fotografías aéreas brindadas por la CVC, con el fin de corregir imprecisiones o agregar información adicional de los drenajes, además de esto el equipo de topografía capturó datos topográficos y batimétricos detallados de los tramos que corresponden a cauces analizados por amenaza de inundación, incluyendo estructuras y elementos que estén asociados de alguna forma con el origen de inundación. Esta información es indispensable para el modelamiento hidráulico de la amenaza por inundación.

El producto cartográfico obtenido para el municipio de Bolívar se puede observar en la Figura 3.7 donde se encuentran los canales, lagos, jagüeyes, madre viejas y los principales afluentes que atraviesan la zona urbana del municipio, como lo son el Zanjón Rincón y Zanjón La Mina ubicados al sur del área urbana del municipio, el Río Pescador ubicado al norte del perímetro urbano del municipio.

Esta capa refleja las características de los diferentes tipos de rocas y depósitos que se agrupan teniendo en cuenta el tipo de roca (ígneas, metamórficas y sedimentarias) así como sus características texturales y sus propiedades geomecánicas. Quizás es la base más importante para poder establecer las unidades a tener en cuenta en la distribución de los diferentes tipos de materiales a lo largo del territorio colombiano. Cada uno de estos materiales presenta propiedades intrínsecas y ofrece diferentes respuestas ante los agentes que actúan para su alteración y así determinar la susceptibilidad de cada uno de ellos a que se produzca un movimiento en masa (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2012).

3.4.3. Formaciones superficiales

El equipo de geología realizó un proceso de fotointerpretación de fotografías aéreas adquiridas en el IGAC que cubren el área del perímetro urbano, para el caso específico de Bolívar la fotografía obtenida es del año 1957. La fotointerpretación fue entregada en formato digital, no vectorial, es decir información analógica escaneada, esta información fue georreferenciada y digitalizada para convertirla a formato vectorial tipo shape. A partir de la fotointerpretación se generó el mapa de formaciones superficiales de la zona urbana para cada uno de los municipios, en la Figura 3.9 se puede observar el resultado cartográfico obtenido para el caso del municipio de Bolívar, para generar este producto cartográfico se aplicaron operaciones de digitalización haciendo uso del software ArcGIS.

El mapa de formaciones superficiales representa los materiales que se encuentran sobre la superficie del territorio y no forma roca consolidada, en el se describen las características de los depósitos identificados, que constituyen las unidades geomorfológicas. Las Formaciones superficiales aflorantes en la zona corresponden a las unidades geológicas, roca dura (Rd), suelo antrópico (Sa), suelo antrópico Jarillón (Saj), suelo antrópico de relleno de escombros (Sale), suelo transportado aluvia (Sta), suelo transportado de aluvial de terrazas (Stat).

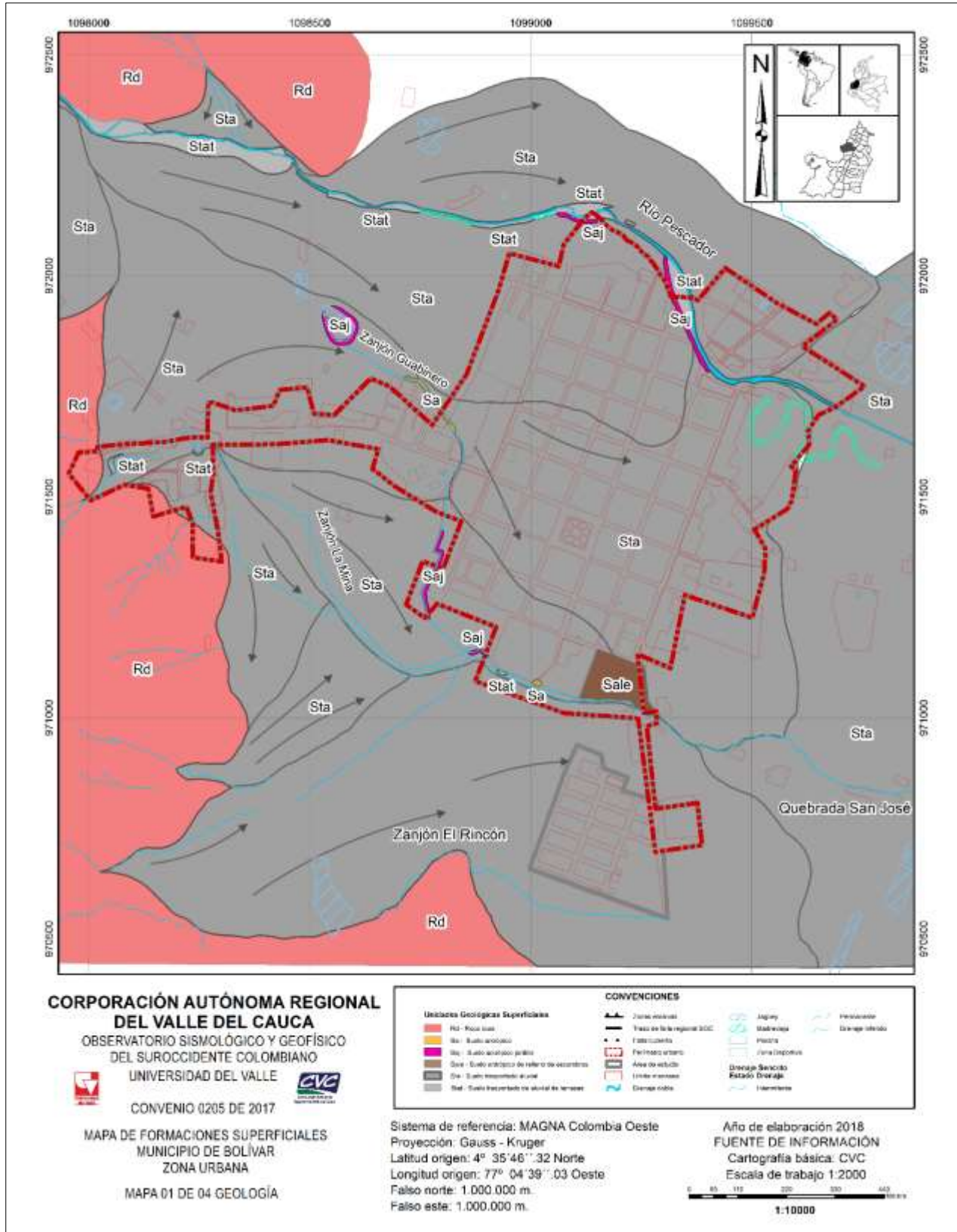


Figura 3.9. Mapa de formaciones superficiales zona urbana del municipio de Bolívar
Fuente: elaboración propia

3.4.4. Geomorfología

A partir de los aspectos geomorfológicos, se identifican las formas típicas de los depósitos como colinas de piedemonte, conos de deyección y barras, al igual que la presencia de antiguos canales que definen las rutas de acceso de los materiales y las posibles zonas de afectación durante las avenidas torrenciales. De otra parte, se analiza la dinámica de las corrientes fluviales a través del tiempo mediante la interpretación de rasgos estructurales. En esta parte juega un papel muy importante la presencia de cauces abandonados y el comportamiento seguido por las demás corrientes de la región (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2012). Este producto se hace con base en la fotointerpretación. El mapa geomorfológico del municipio de Bolívar se puede observar en la Figura 3.10.

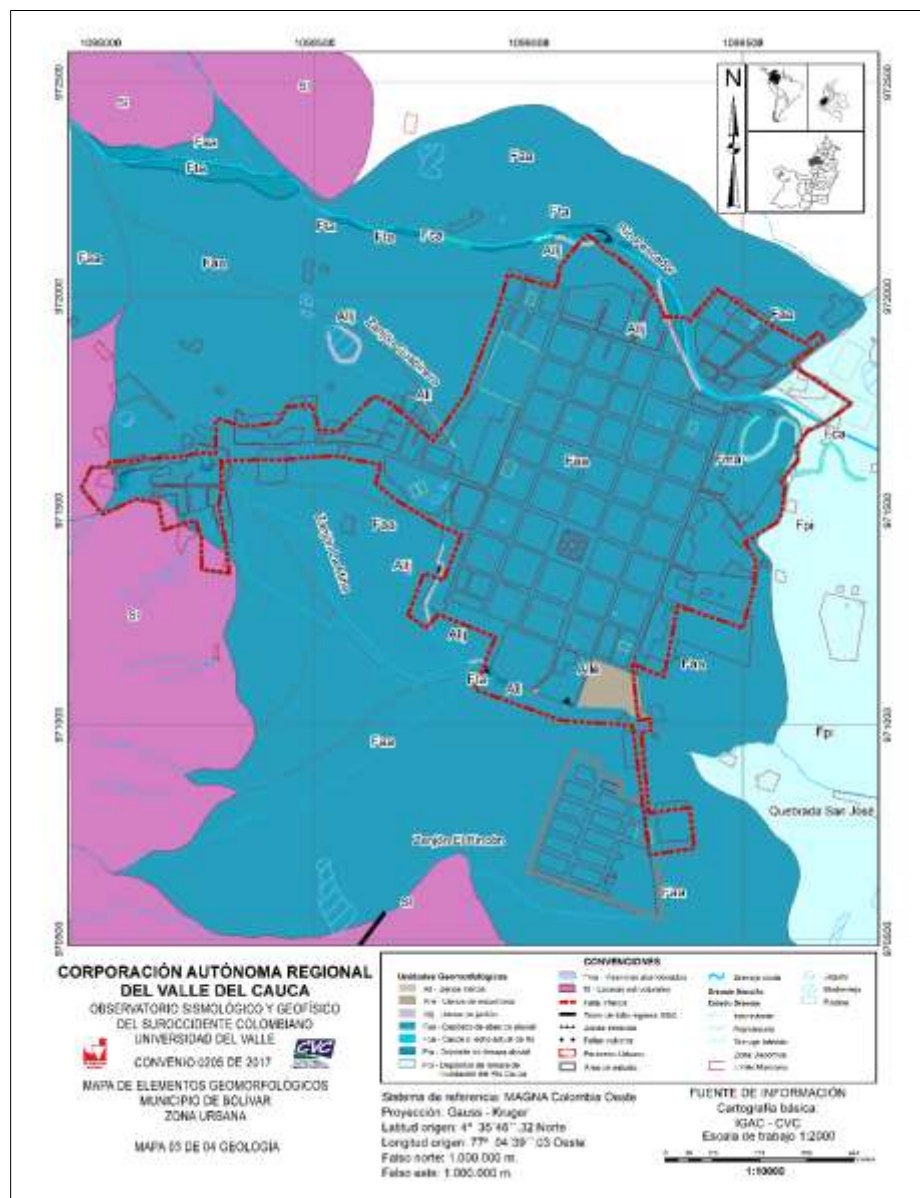


Figura 3.10. Mapa de elementos geomorfológicos área urbana del municipio de Bolívar

Fuente: Elaboración propia

3.5. AMENAZA POR INUNDACIÓN

El objetivo del análisis espacial de precipitaciones consiste principalmente en determinar los factores de intensidad, frecuencia y duración, lo que se logra con las herramientas de SIG es analizar la distribución espacial de las precipitaciones, es decir se identifican las zonas donde más llueve, como se distribuyen esas lluvias en el espacio y con qué intensidad se presentan en ciertos periodos de tiempo.

Los resultados cartográficos obtenidos son el mapa de precipitaciones mensuales multianuales para cada uno de los municipios en el periodo 1983-2017 la Figura 3.11 se puede observar el resultado cartográfico obtenido para el municipio de Bolívar, donde se muestra la distribución espacial de las precipitaciones a nivel mensual, además los mapas de precipitaciones máximas en 24, 48 y 72 horas asociadas a cada periodo, las cuales se pueden observar en las Figura 3.12, 3.13 y 3.14, respectivamente. Estos resultados en conjunto con el mapa base y la topografía del terreno son insumo fundamental para la modelación hidrológica de cada uno de los causes realizada por el equipo de hidráulica, la cual se realiza usando el modelo HEC-HMS.

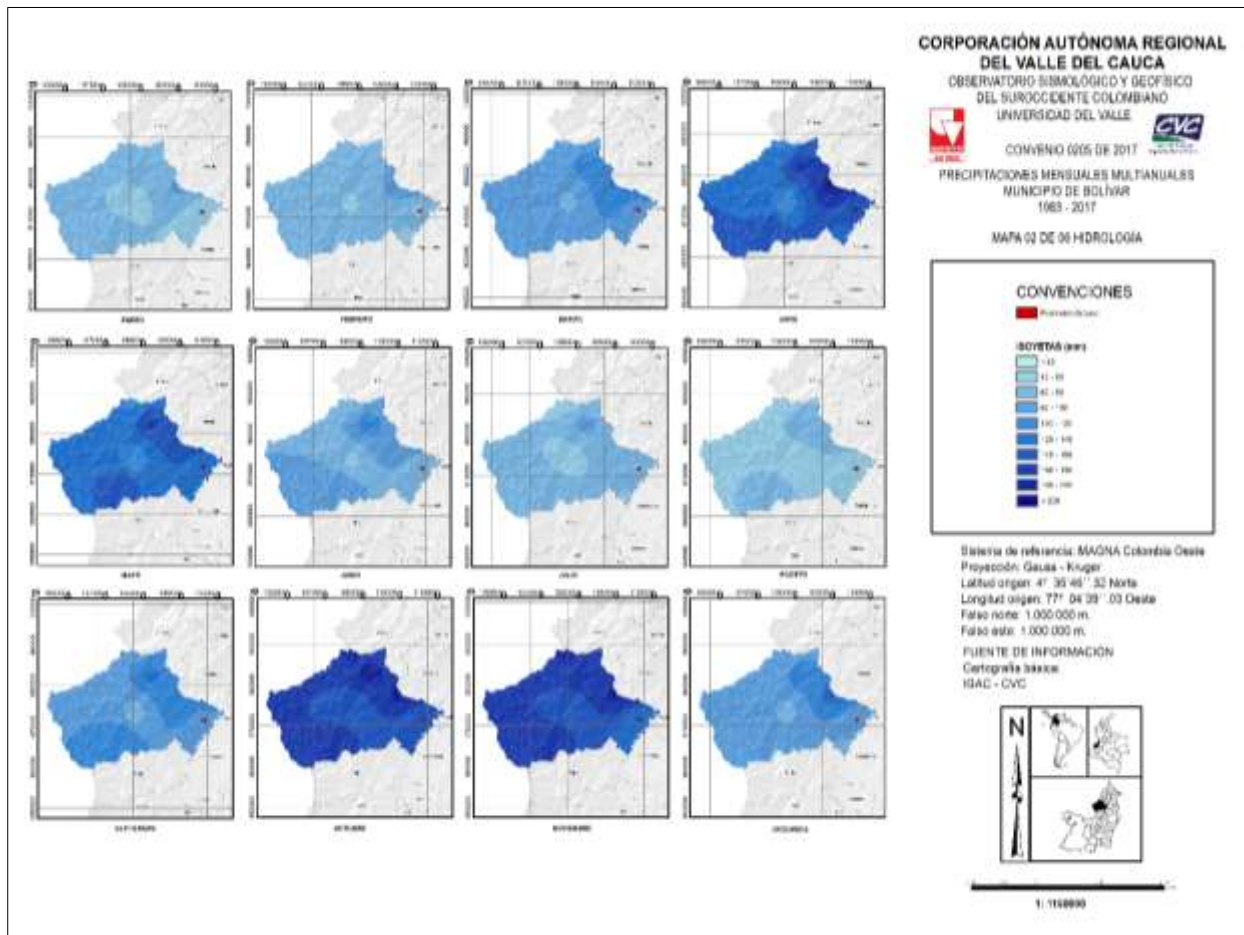


Figura 3.11. Mapa de precipitaciones mensuales multianuales municipio de Bolívar periodo 1983-2017

Fuente: elaboración propia

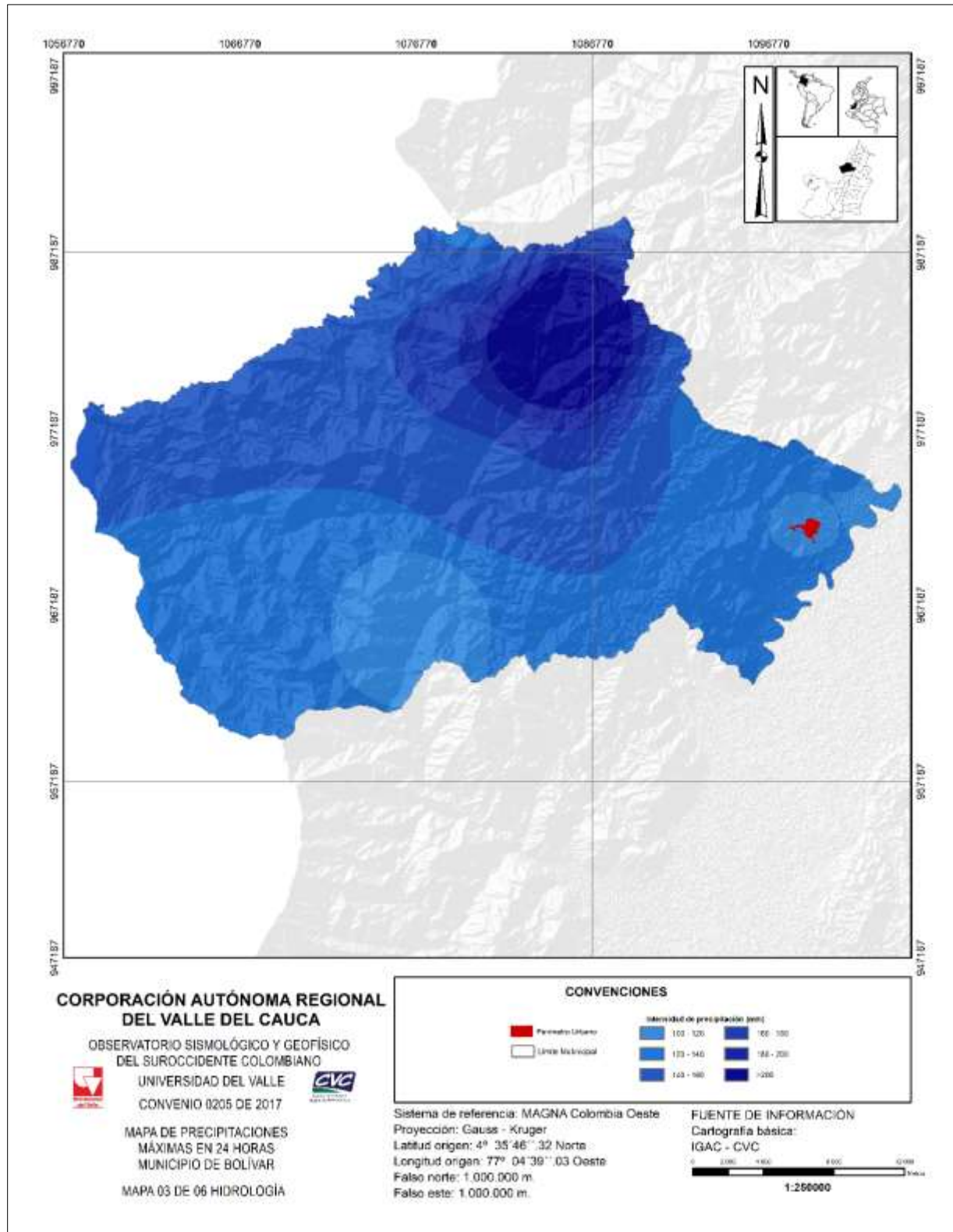


Figura 3.12. Mapa de precipitaciones máximas en 24 horas municipio de Bolívar
Fuente: elaboración propia

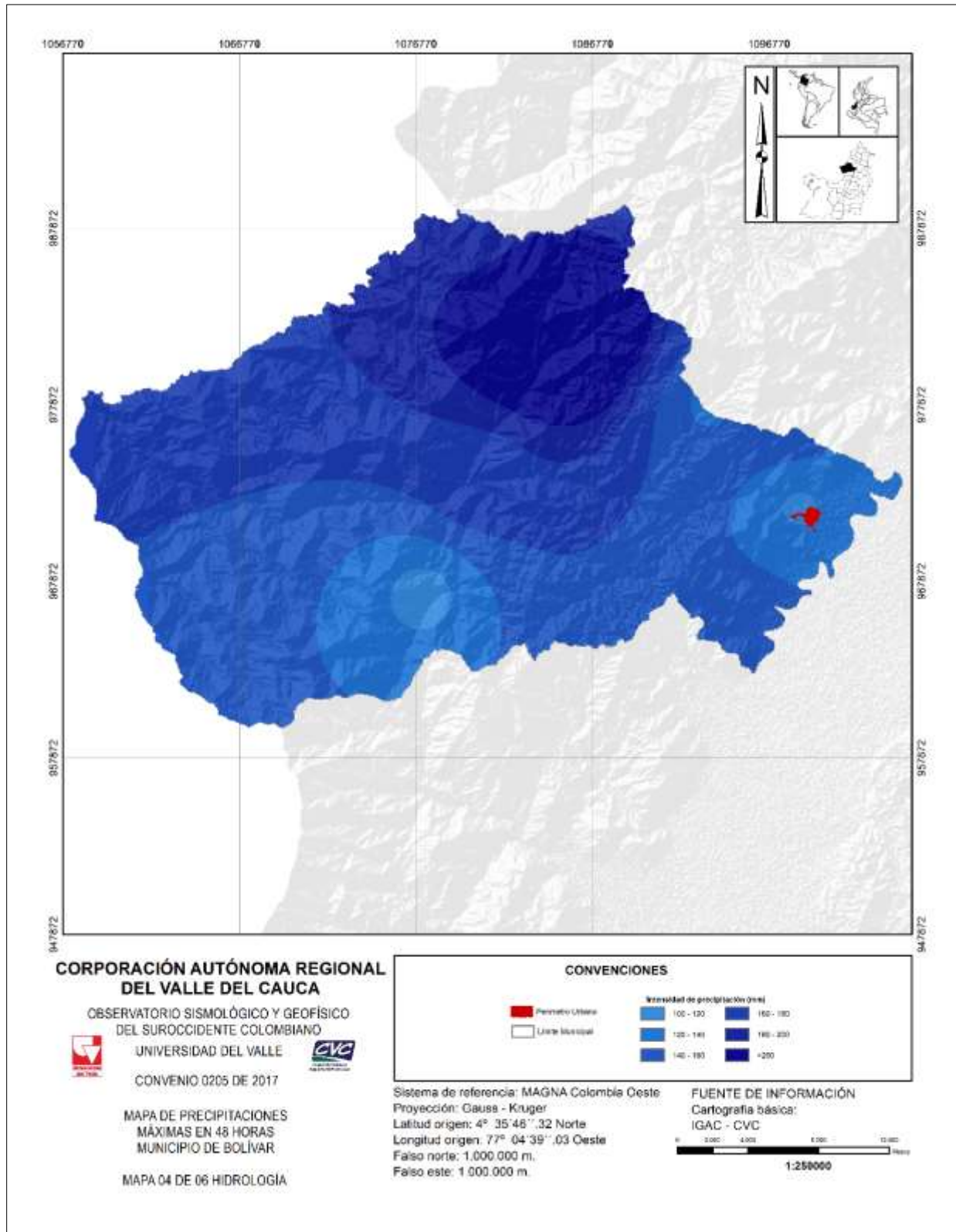


Figura 3.13. Mapa de precipitaciones máximas en 48 horas municipio de Bolívar
Fuente: elaboración propia

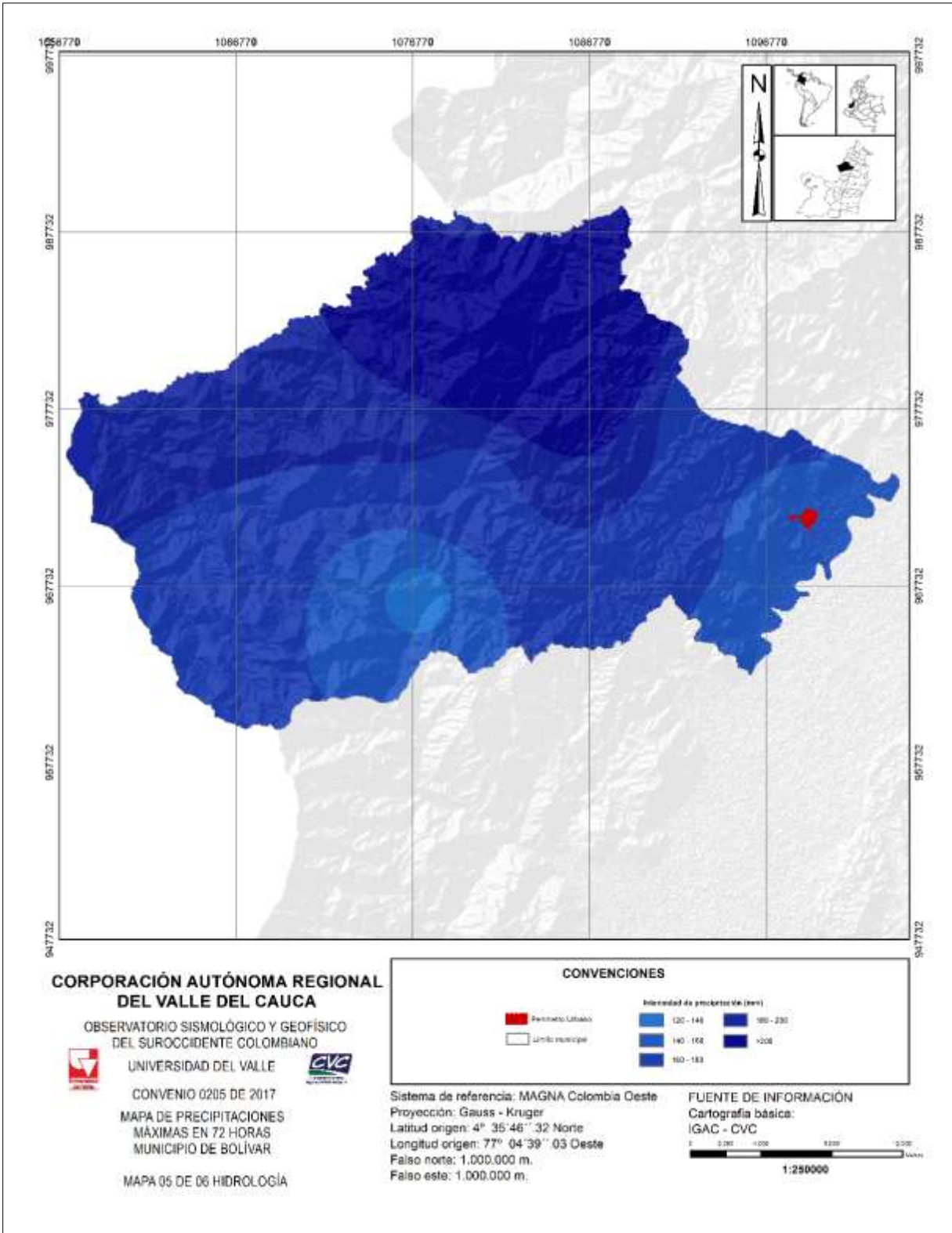


Figura 3.14. Mapa de precipitaciones máximas en 72 horas municipio de Bolívar
Fuente: elaboración propia

Finalmente, se obtiene el producto amenaza por inundación del área urbana del para cada municipio, en la Figura 3.15 se puede observar el producto cartográfico obtenido para el área urbana del municipio de Bolívar, donde se puede evidenciar que gran parte del municipio se ve afectado por amenaza media y alta en cuanto a inundación se refiere. Después se determinan los niveles de intensidad o magnitud del evento, a cada escenario seleccionado de mapa de inundación se le debe realizar una clasificación cualitativa de acuerdo a su intensidad o magnitud.

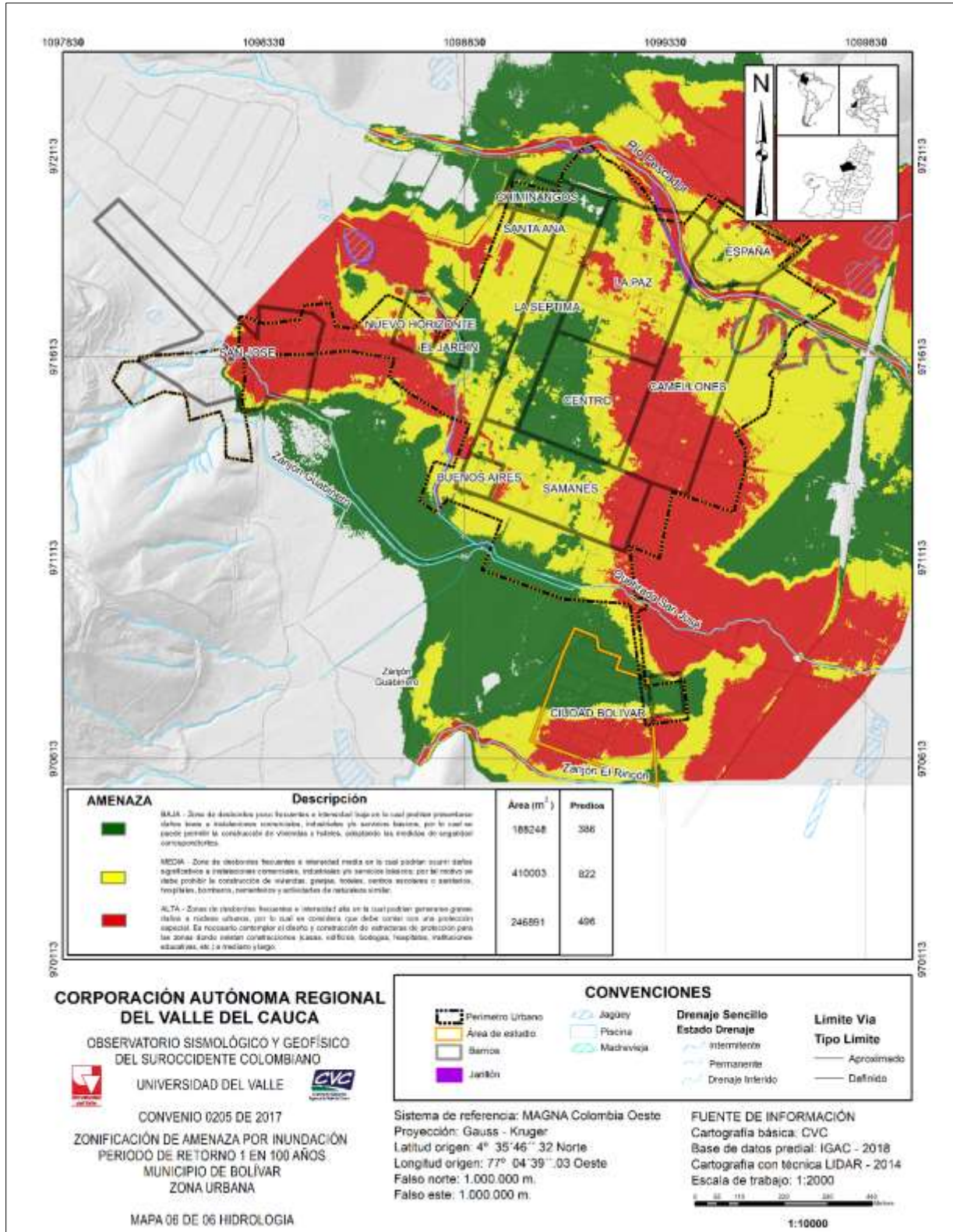


Figura 3.15. Mapa de amenaza por inundación área urbana municipio de Bolívar
Fuente: elaboración propia

3.6. VULNERABILIDAD

El cálculo de la vulnerabilidad para cada uno de los fenómenos de estudio, se establece a partir del análisis las variables estructurales y corporales, terminando por fusionar sus respectivos resultados a través de una suma ponderada con valores normalizados, los cuales corresponden a la siguiente clasificación:

- Vulnerabilidad BAJA (0 – 0,15)

Los elementos expuestos en la zona se caracterizan por presentar en los centros poblados unos niveles de vulnerabilidad socioeconómica y estructural baja, cuyas condiciones de infraestructura son adecuadas.

- Vulnerabilidad MEDIA (0,15 – 0,5)

Los elementos expuestos en la zona se caracterizan por presentar en los centros poblados unos niveles de vulnerabilidad socioeconómica y estructural relativamente moderados.

- Vulnerabilidad ALTA (0,5 – 1)

Los elementos expuestos en la zona se caracterizan por presentar en los centros poblados mayor contacto con la amenaza, sus condiciones socioeconómicas y estructurales generalmente son precarias, acompañados de una nula capacidad de resistencia frente a situaciones adversas en este rango de vulnerabilidad

La metodología de análisis para dichas variables se adapta de la propuesta de Li *et al* (2010) a partir de los valores de intensidad del fenómeno (I) y la capacidad de resistencia de los elementos expuestos (S). Este marco metodológico se encuentra mejor abordado en el documento del equipo de Vulnerabilidad.

3.6.1. Inundación

Para el casco urbano del municipio de Bolívar, los cálculos de vulnerabilidad por inundación abarcan amplias zonas del área de estudio (Figura 3.16 y 3.17). Las Tabla 3.1 y 3.2 establece los porcentajes de área de valores de vulnerabilidad con respecto al área del casco urbano, mientras que las Tabla 3.3 y 3.4 muestra el porcentaje de predios y la cantidad de estos encontrados en los diferentes grados de vulnerabilidad con respecto a la totalidad de predios en el casco urbano.

Tabla 3.1. Porcentaje de áreas a partir de los grados de vulnerabilidad corporal

GRADO DE VULNERABILIDAD	ÁREA (METROS CUADRADOS)	PORCENTAJE (%)
ALTA	83149.9	10.17
MEDIA	121907.7	14.92
BAJA	84541.4	10.34
NULA	527737.2	64.57
ÁREA TOTAL (CASCO URBANO)	817336.2	100.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.2. Porcentaje de áreas a partir de los grados de vulnerabilidad estructural

GRADO DE VULNERABILIDAD	NÚMERO DE PREDIOS	PORCENTAJE (%)
ALTA	103910.5	12.71
MEDIA	95821.3	11.72
BAJA	100855.5	12.34
NULA	516748.9	63.22
PREDIAL (CASCO URBANO)	817336.1678	100

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.3. Porcentaje de predios a partir de los grados de vulnerabilidad corporal

GRADO DE VULNERABILIDAD	NÚMERO DE PREDIOS	PORCENTAJE (%)
ALTA	218	12.44
MEDIA	386	22.03
BAJA	261	14.90
NULA	887	50.63
PREDIAL (CASCO URBANO)	1752	100.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4. Porcentaje de predios a partir de los grados de vulnerabilidad estructural

GRADO DE VULNERABILIDAD	NÚMERO DE PREDIOS	PORCENTAJE (%)
ALTA	309	17.64
MEDIA	284	16.21
BAJA	309	17.64
NULA	850	48.52
<i>Predial (Casco Urbano)</i>	1752	100.00

Fuente: elaboración propia.

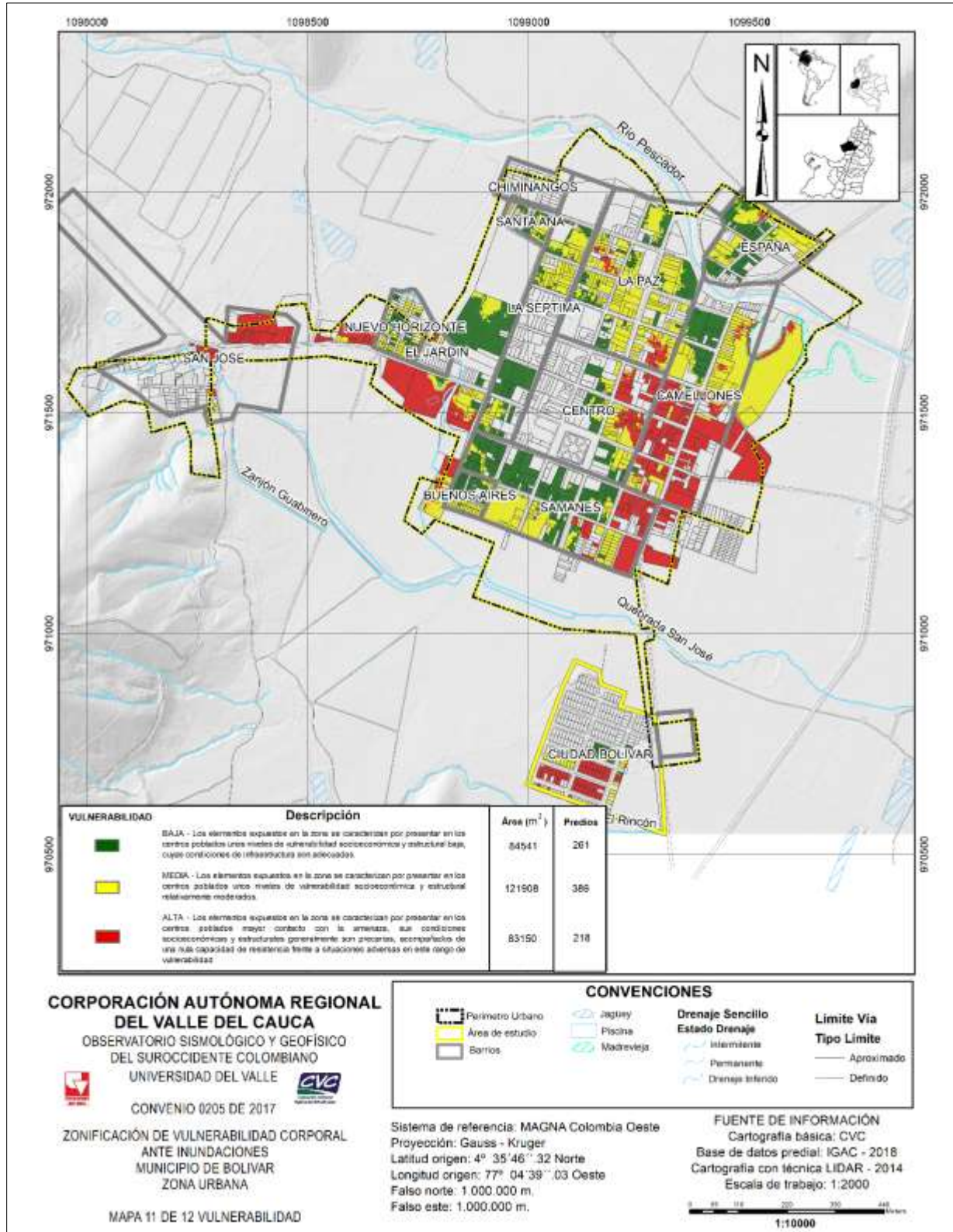


Figura 3.16. Mapa de vulnerabilidad corporal por inundación zona urbana del municipio de Bolívar

Fuente: Elaboración propia

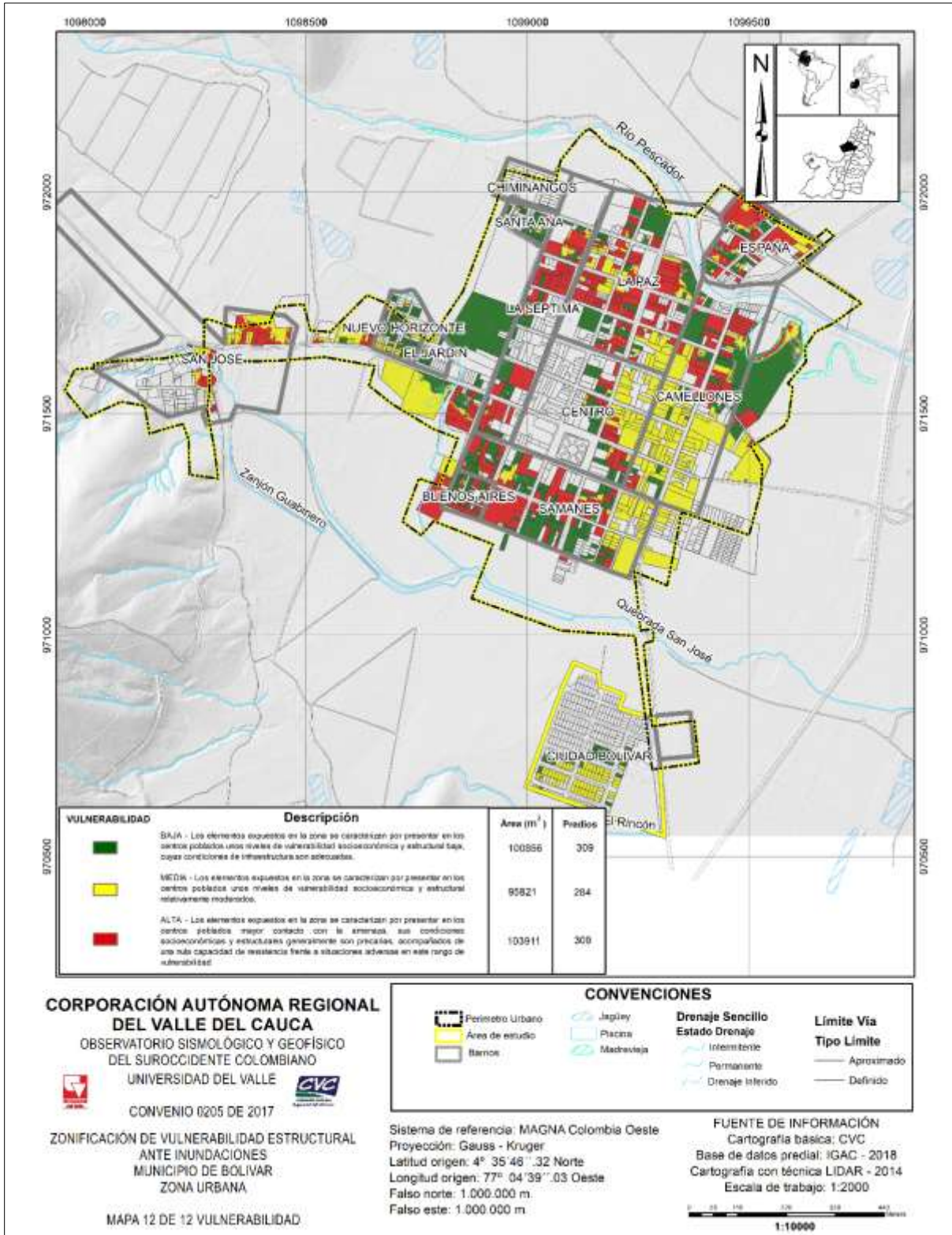


Figura 3.17. Mapa de vulnerabilidad estructural por inundación zona urbana del municipio de Bolívar

Fuente: Elaboración propia

3.7. ÁREAS DE AFECTACIÓN

Las áreas de afectación se obtienen a partir del producto de los resultados de vulnerabilidad con los resultados de amenaza, en un formato rasterizado de valores no normalizados entre 0 y 3, los cuales corresponden a la siguiente clasificación:

- Afectación BAJA (0 a 1)

La zona se caracteriza por presentar unos niveles de amenaza relativamente bajos al igual que unas condiciones de vulnerabilidad bajas. Los daños que pueden presentarse en las edificaciones son ligeros sin que se vea afectada la estabilidad de las estructuras.

- Afectación MEDIA (1 a 2)

La zona se caracteriza por presentar unos niveles de amenaza moderada, al igual que unos niveles de vulnerabilidad socioeconómica y estructural relativamente moderados.

- Afectación ALTA (2 a 3)

La zona se caracteriza por presentar unas condiciones complejas de exposición a la amenaza, además de valores de vulnerabilidad alta y media caracterizada por edificaciones precarias y en mal estado, además de una población con poca o nula capacidad de resistencia.

La afectación ALTA a su vez se subdivide en otras dos clasificaciones:

- Afectación ALTA Mitigable

Se define como aquellos sectores en donde por sus características de amenaza y vulnerabilidad, existe una probabilidad de que se presenten pérdidas de vidas humanas, bienes e infraestructura, pero es susceptible de disminuir su severidad con la implementación de medidas de mitigación estructurales y no estructurales.

- Afectación ALTA No Mitigable

Se definen como aquellos sectores en donde por sus características de amenaza y vulnerabilidad, existe una alta probabilidad de que se presenten pérdidas de vidas humanas, bienes e infraestructura. La mitigación no es viable por condiciones técnico-económicas, por lo cual se debe llevar a cabo un proceso de reubicación de las viviendas y equipamiento.

3.7.1. Inundación

Para el casco urbano del municipio de Bolívar, los cálculos de las áreas de afectación por inundación abarcan amplias zonas del área de estudio (Figura 3.18 y 3.19). La Tabla 3.5 establece los porcentajes de área para los valores de afectación con respecto al área del casco urbano, mientras que la Tabla 3.6 muestra el porcentaje de predios y la cantidad de estos encontrados en los diferentes grados de las áreas de afectación con respecto a la totalidad de predios en el casco urbano.

Tabla 3.5. Porcentaje de áreas a partir de los grados de afectación

GRADO DE AFECTACIÓN	ÁREA (METROS CUADRADOS)	PORCENTAJE (%)
ALTA (No Mitigable)	5448,8	16.01
ALTA (Mitigable)	0	23.47
MEDIA	150192,7	16.28
BAJA	165985,7	44.24
NULA	229739,6	100.00
ÁREA TOTAL (CASCO URBANO)	519338,6	16.01

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.6. Porcentaje de predios a partir de los grados de afectación

GRADO DE VULNERABILIDAD	NÚMERO DE PREDIOS	PORCENTAJE (%)
ALTA (No Mitigable)	13	0.74
ALTA (Mitigable)	272	15.53
MEDIA	411	23.46
BAJA	185	10.56
NULA	871	49.71
PREDIAL (CASCO URBANO)	1752	100.00

Fuente: elaboración propia.

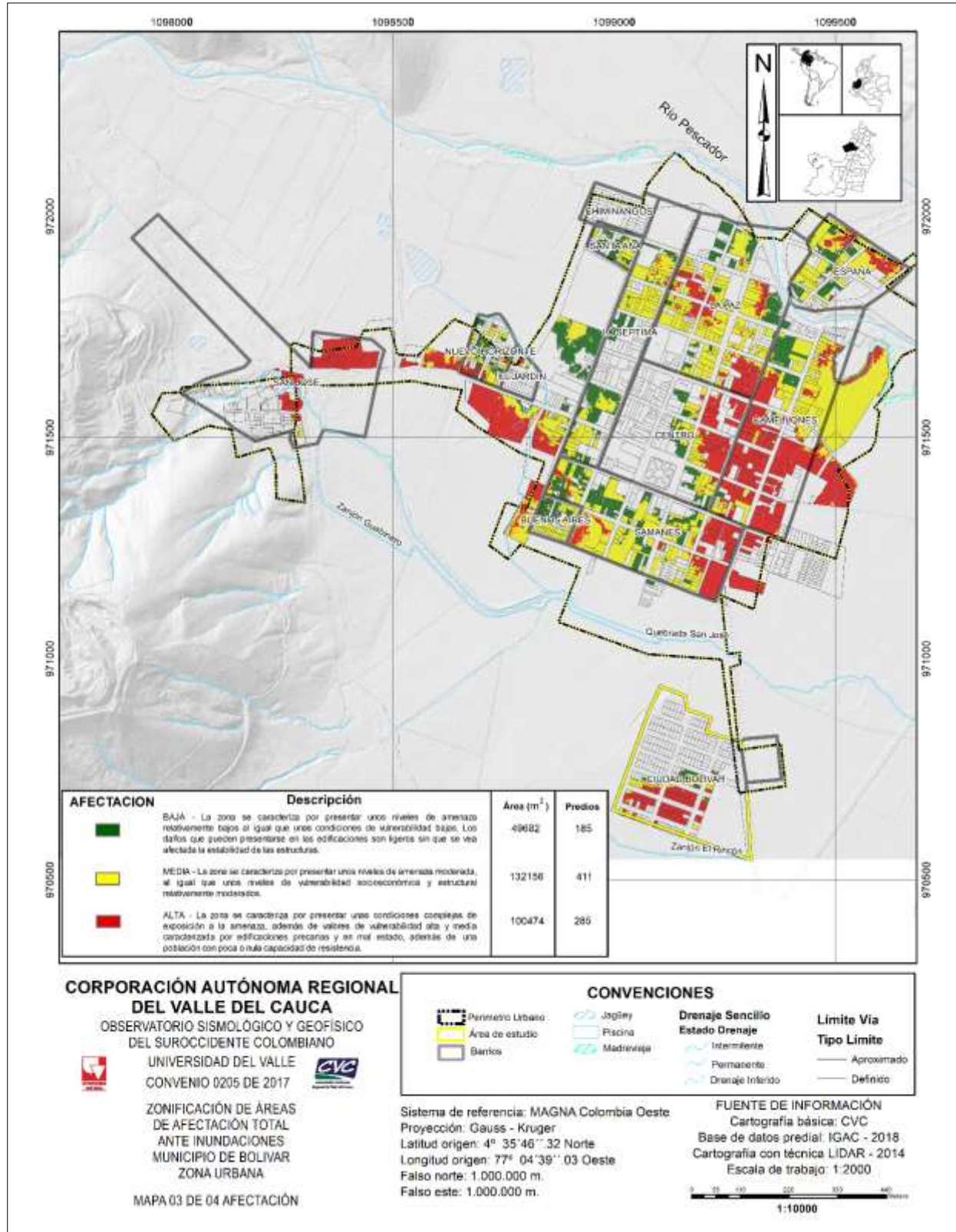


Figura 3.18. Mapa de áreas de afectación por inundación área urbana municipio de Bolívar
Fuente: elaboración propia

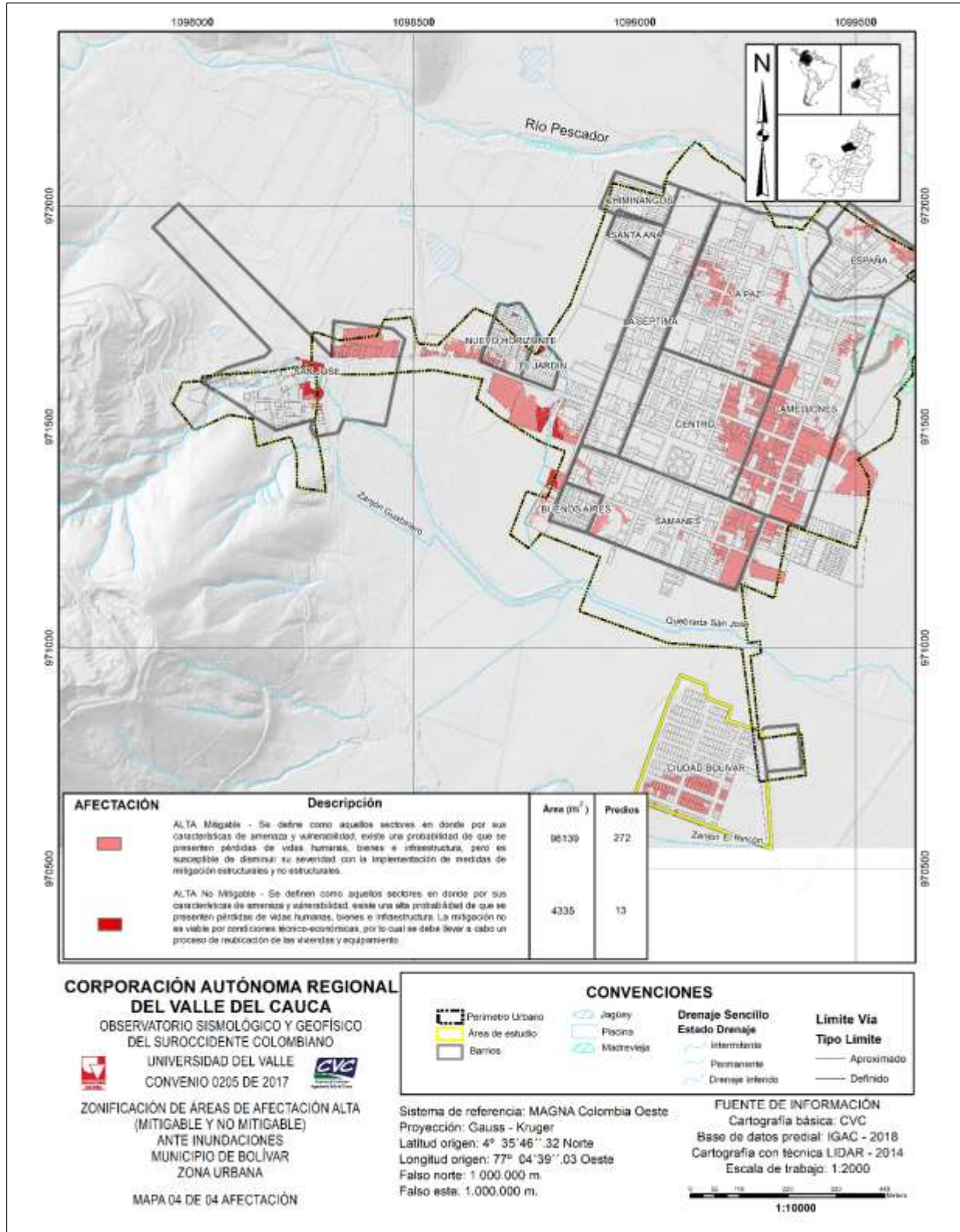


Figura 3.19. Mapa de áreas de afectación ALTA (Mitigable y no mitigable) por inundación - Área urbana municipio de Bolívar

Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

Se caracterizaron las operaciones necesarias en el desarrollo de las metodologías para zonificación de susceptibilidad por movimientos de masa y amenaza por inundación en el área urbana del municipio de Bolívar.

Se definieron las operaciones más relevantes dentro del procesamiento de datos para la aplicación de la metodología.

- Operaciones de digitalización
- Operaciones de clasificación de variables
- Operaciones entre mapas
- Integración de Información
- Operaciones de análisis espacial

Se definieron los procedimientos espaciales más adecuados para la generación de los productos y se propusieron mejoras en dichos procedimientos mediante el uso de herramientas modernas que potencializan y optimizan los análisis de la información espacial. En particular, la metodología propuesta presenta mejoras importantes, a los métodos y procedimientos de estudio de historicidad convencionales, tales como la implementación de métodos de análisis espacial a partir de la densidad de kernel para el cálculo de zonas susceptibles a inundaciones según los datos de historicidad puntuales y el procedimiento de análisis espacial de los eventos de historicidad no puntuales a partir de la topografía del terreno para sesgar la información obtenida en estos casos, los resultados de estas metodologías fueron validados con la población y organismos municipales a partir de los talleres de socialización de resultados de historicidad, donde se pudo corroborar la coherencia de las hipótesis planteada y los resultados obtenidos aplicando esta metodología.

Los sistemas de información geográfica (SIG) se convierten en herramientas de apoyo a la toma de decisiones, de carácter preventivo no estructural, importante en el proceso de gestión de riesgos, dado que permiten hacer evaluaciones de las amenazas y luego permiten disminuir las condiciones de riesgo en los municipios.

Se construyó un total de 36 mapas entre sub productos y productos entregables dentro del proyecto para el cálculo de las variables necesarias en este tipo de estudio, aplicando el procedimiento metodológico del Servicio Geológico Nacional y CVC, los cuales son insumo fundamental para la incorporación de la gestión del riesgo en el Esquemas de Ordenamiento Territorial del municipio de Bolívar, los productos cartográficos obtenidos son listados a continuación.

LISTADO DE PRODUCTOS Y SUB PRODUCTOS

- 1 Mapa de localización del municipio de Bolívar
- 2 Mapa división político-administrativa del área urbana del municipio de Bolívar escala 1:120000
- 3 Mapa político administrativo municipio de Bolívar Zona urbana 1:20000
- 4 Mapa base municipio de Bolívar escala 1:20000
- 5 Mapa base municipio de Bolívar escala 1:5000
- 6 Mapa de historicidad por barrios con reportes de eventos de inundación zona urbana municipio de Bolívar

- 7 Mapa de eventos históricos de inundación zona urbana del municipio de Bolívar periodo 1970-2018
- 8 Mapa de hidrología zona urbana municipio de Bolívar escala 1:5000
- 9 Mapa de hidrología zona urbana municipio de Bolívar escala 1:20.000
- 10 Ortofotomapa estaciones de campo equipo geología escala 1:5000
- 11 Ortofotomapa estaciones de campo equipo geología escala 1:20.000
- 12 Ortofotomapa anotaciones de campo equipo geotecnia escala 1:1500
- 13 Ortofotomapa anotaciones de campo equipo geotecnia escala 1:5000
- 14 Mapa geológico zona urbana municipio de Bolívar escala 1:1500
- 15 Mapa geológico zona urbana municipio de Bolívar escala 1:5000
- 16 Mapa fotogeológico zona urbana municipio de Bolívar año 1957
- 17 Mapa de formaciones superficiales zona urbana del municipio de Bolívar
- 18 Mapa de elementos geomorfológicos área urbana del municipio de Bolívar
- 19 Mapa modelo digital de superficie escala 1:5000
- 20 Mapa modelo digital de superficie escala 1:20000
- 21 Mapa de cobertura de la tierra zona municipio de Bolívar
- 22 Mapa de pendientes zona urbana municipio de Bolívar escala 1:5000
- 23 Mapa de pendientes zona urbana municipio de Bolívar escala 1:20000
- 24 Mapa de precipitaciones mensuales multianuales municipio de Bolívar periodo 1983-2017 escala 1:150000
- 25 Mapa de precipitaciones mensuales multianuales municipio de Bolívar periodo 1983-2017 escala 1:500000
- 26 Mapa de precipitaciones máximas en 24 horas municipio de Bolívar escala 1:125000
- 27 Mapa de precipitaciones máximas en 48 horas municipio de Bolívar escala 1:125000
- 28 Mapa de precipitaciones máximas en 72 horas municipio de Bolívar escala 1:125000
- 29 Mapa de amenaza por inundación área urbana municipio de Bolívar escala 1:5000
- 30 Mapa de amenaza por inundación área urbana municipio de Bolívar escala 1:20000
- 31 Mapa de vulnerabilidad por inundación área urbana municipio de Bolívar escala 1:5000
- 32 Mapa de vulnerabilidad por inundación área urbana municipio de Bolívar escala 1:20000
- 33 Mapa de áreas de afectación por inundación área urbana municipio de Bolívar escala 1:5000
- 34 Mapa de áreas de afectación por inundación área urbana municipio de Bolívar escala 1:20000
- 35 Mapa de áreas de afectación ALTA (Mitigable y no mitigable) por inundación - Área urbana municipio de Bolívar escala 1:5000
- 36 Mapa de áreas de afectación ALTA (Mitigable y no mitigable) por inundación - Área urbana municipio de Bolívar escala 1:20000

REFERENCIAS

- Abarquez, I. y Murshed, Z. (2004). *Field Practitioners' Handbook, Community-based Disaster Risk Management*. Bangkok, Centro Asiático de Preparación para Casos de Desastre.
- Alcaldía Municipal de Bolívar. (2000). *Plan basico de ordenamiento territorial municipio de Bolívar Valle del Cauca*.
- Alvarado F., C., Medina B., E., Sandoval R., J., & García N., J. (2012). *Zonificación de amenaza por movimientos en masa aplicando un método bivariado y un proceso heurístico. caso aplicado a la cuenca del Río Combeima, Ibagué-Tolima-Colombia*
- Banco Mundial Colombia. (2012). *Análisis de la gestión de riesgos de desastres en Colombia un aporte para la construcción de políticas públicas*. Bogotá: Banco Mundial.
- Caloni, N. (2007). *Análisis espacial con SIG ráster*. Resistencia, Argentina.
- Calvello, M., Cascini, L., & Mastroianni, S. (2013). *Landslide zoning over large areas from a sample inventory by means of scale-dependent terrain units*. *Geomorphology*, 182, 33-48. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12004904>
- Carvacho Bart, L. (2010). *Geoprocesos utilizando sistemas de información geográfica. Taller regional sobre Cartografía censal con miras a la ronda de censos 2010 en Latinoamérica*. Chile.
- Coral Chacón, F., & Chamorro Benavies, J. P. (2016). *Zonificación de amenaza a incendios forestales en el departamento del Cauca*. Manizales, Colombia.
- Coronado, J. A. (2006). *Avaliação da suscetibilidade a deslizamentos por meio do uso de sistemas de informações geográficas: Aplicação em uma area do eixo cafeiteiro Colombiano*. Trabajo de grado Master en Geotécnia. Brasília D.F.
- Departamento Nacional de Planeación. (2018). *Índice municipal de riesgo de desastres de Colombia*. Bogotá: Gobierno de Colombia.
- Deshogues, A., & Gilliéron, P. (2009). *Geomatics E-learning with Exomatic: Implementation and Assessment*. Barcelona.
- Duckham, M., Kealy, A., & Wallace, J. (2009). *International Encyclopedia of Human Geography*. Elsevier.
- El congreso de Colombia. (24 de Abril de 2012). *Ley 1523 de 2012*. Colombia.
- Grupo de hidráulica e hidrología, OSSO. (2010). *Zonificación de amenazas y escenarios de riesgo por movimientos en masa, inundaciones y crecientes torrenciales del área urbana y de expansión de los municipios de Buga, Riofrío, Dagua, El Cairo y La Unión*.
- Grupo geotécnia OSSO. (2018). *Evaluación y zonificación de la amenaza por movimientos en masa en zona urbana del municipio de versalles*. Cali.
- Hernández Vásquez, A., Azañedo, D., Bendezú Quispe, G., Pacheco Mendoza, J., & Martín Chaparro, R. (2016). *Sistemas de información geográfica: aplicación práctica para el estudio de atropellos en el Cercado de Lima, Perú*. *Revista peruana de medicina experimental y salud pública*, 33, 725-731. Obtenido de <https://rpmesp.ins.gob.pe/index.php/rpmesp/article/view/2558>
- IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2012). *Metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa*. Bogotá.
- Ingeominas. (2001). *Guía metodológica para la zonificación de amenazas por fenómenos de remoción en masa - Método univariado- y escenarios de riesgo por avenidas torrenciales*. Bogotá.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2004). *Adopción del marco geocéntrico nacional de referencia Magna-Sirgas como datum oficial de Colombia*. Bogotá D.C.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

- Inter-Agency Standing Committee IASC. (2019). Inform global risk results 2018. Inter-Agency Standing Committee IASC. Obtenido de <http://www.inform-index.org/Subnational/Colombia#maps>
- La Red. (1993). Los desastres no son naturales. Bogotá: LA RED, Red de estudios sociales en prevención de desastres en América latina.
- Li, Z., Nadim, F., Huang, H., Uzielli, M., & Lacasse, S. (2010). Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, 7(2), 125-134.
- Maguire, D., (1991). An overview and definition of GIS. *Geographical information systems*, 9-20.
- Milanes Batista, C., Galbán Rodríguez, L., & Olaya Coronado, N. J. (2017). Amenazas, riesgos y desastres visión teórica-metodológica y experiencias relaes. Barranquilla: Corporación Universidad de la Costa, EDUCOSTA.
- Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. (2014). Decreto Número1807 de 2014. Decreto. Colombia.
- Observatorio Sismológico del Suroccidente Colombiano - OSSO. (2018). Informe Técnico de Historicidad de Eventos por Inundación y Movimientos en Masa en la Zona Urbana del Municipio de Bolívar . Cali, Colombia.
- Olaya, V., (2014). Sistemas de información geográfica. Obtenido de http://volaya.github.io/libro-sig/chapters/Introduccion_fundamentos.html
- Rodriguez de la Torre, F. (1993). Lecturas sistemáticas de prensa periódica. Hacia una revisión de la sismicidad europea durante los siglos XVII y XVIII. Historical investigation of European earthquakes. Obtenido de https://emidius.mi.ingv.it/RHISE/i_18del/i_18del.html
- Rodríguez de la Torre, F. (1993). Lecturas sistemáticas de prensa periódica. Hacia una revisión de la sismicidad europea durante los siglos XVII y XVIII. Madrid.
- Salgado Montoya, R. A. (2005). Análisis integral del riesgo a deslizamientos e inundaciones en la microcuenca del Río Gila en Copán, Honduras. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Secretaria de Planeación Departamental Gobernación del Valle del Cauca. (2011). La gestión del riesgo en el ordenamiento territorial. Cali.
- Servicio Geológico Colombiano. (2016). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogota, D.C.
- Silverman, B. W. (1986). Density Estimation for Statistical and Data Analysis. Bath.
- The world bank group. (2018). Colombia dashboard Natural hazards. Washington DC. Obtenido de http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/countryprofile/home.cfm?page=country_profile&CCode=COL&ThisTab=NaturalHazards
- Vega Gutierrez, J. A. (2013). Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados poreventos sismicos en la ciudad de Medellin usando herramientas de la geomática - Caso aplicado a edificaciones urbanas -. Tesis de Maestría. La plata, Argentina.
- Westen, C.J.. (2018). Análisis Estadístico de Riesgo de Deslizamiento.
- Zapata Balanqué, J. A. (2007). Empleo de herramientas de la geomática en la microzonificación sísmica de ciudades. Ejemplos de caso: Santiago de Cuba y Guantánamo como propuesta ed gestión del desarrollo. Obtenido de Biblioteca virtual en salud Honduras: <http://www.bvs.hn/cu-2007/ponencias/GEO/GEO-014.pdf>