



Actualización del Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa para el Corredor de Ocensa

Oscar Correa Calle, Manuel A. Botía Díaz, Francisco J. García Orozco,
Jorge J. Vélez Upegui, Joan S. Quintero Londoño

OCENSA



Grupo de trabajo académico en
Ingeniería Hidráulica y Ambiental



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sunrise_on_Vereda_del_Lago_and_Eagle_Austin_Ship_in_Maracaibo_lake.jpg



Autor: Wilfredo R. Rodríguez H.

Derechos de autor: Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain



Complejidad geológica, morfológica, topográfica, hidráulica, sísmica, climática y antrópica





Rasgos Litológicos y condiciones cinemáticas de inestabilidad

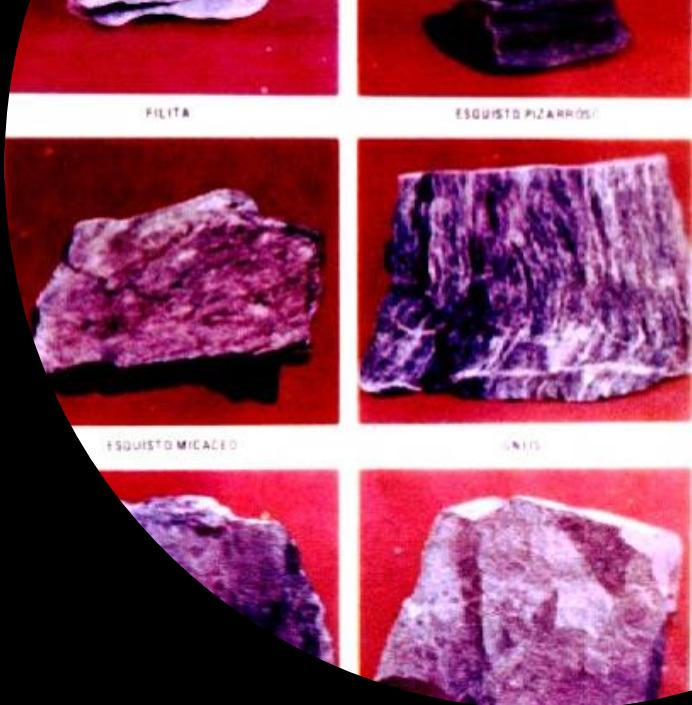
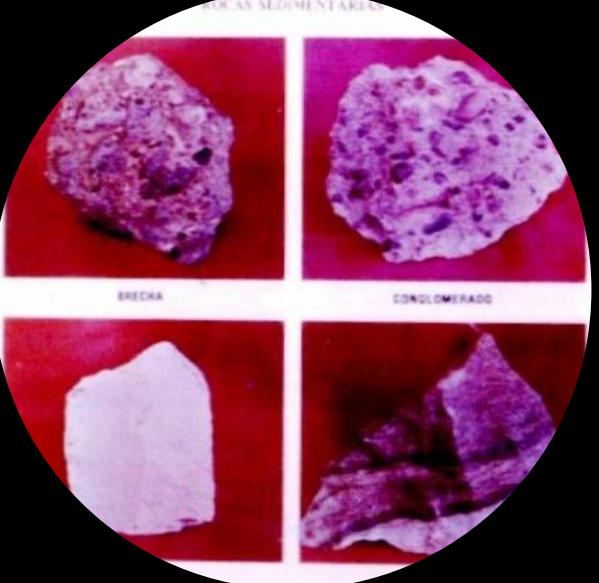
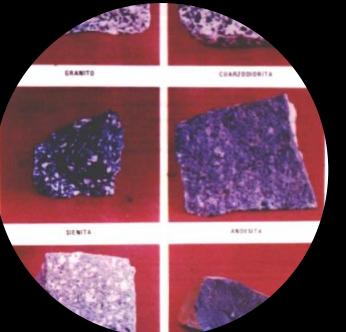
Rasgos Geológico - Estructurales





Estado, condición e intervención de macizos





Rasgos mineralógicos



Rasgos genéticos y texturales



Pendientes y longitudes de pendientes

Sismos Detonantes

(efectos del sismo de
Tauramena, 1995)



IPG 2023

INTERNATIONAL PIPELINE GEOTECHNICAL CONFERENCE
23 y 24 de Noviembre. Bogotá D.C. - Colombia

Con el apoyo de:



Organiza:

C-IPG
Comité Técnico IPG



CLIMA Iluvias detonantes



6^a CONFERENCIA INTERNACIONAL GEOTECNIA DE DUCTOS



Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales





Erosión fluvial e interfluvial



Movimientos en masa



Movimientos en masa





Calidad constructiva





Análisis de Susceptibilidad por Movimientos en Masa en Sistemas de Transporte de Hidrocarburos

Insumo para:
Evaluación de Geoamenazas
Emisión de Alertas Tempranas
Gestión de Riesgos para la Integridad
y para la Seguridad de Procesos

IPG 2023

INTERNATIONAL PIPELINE GEOTECHNICAL CONFERENCE

23 y 24 de Noviembre. Bogotá D.C. - Colombia

Con el apoyo de:

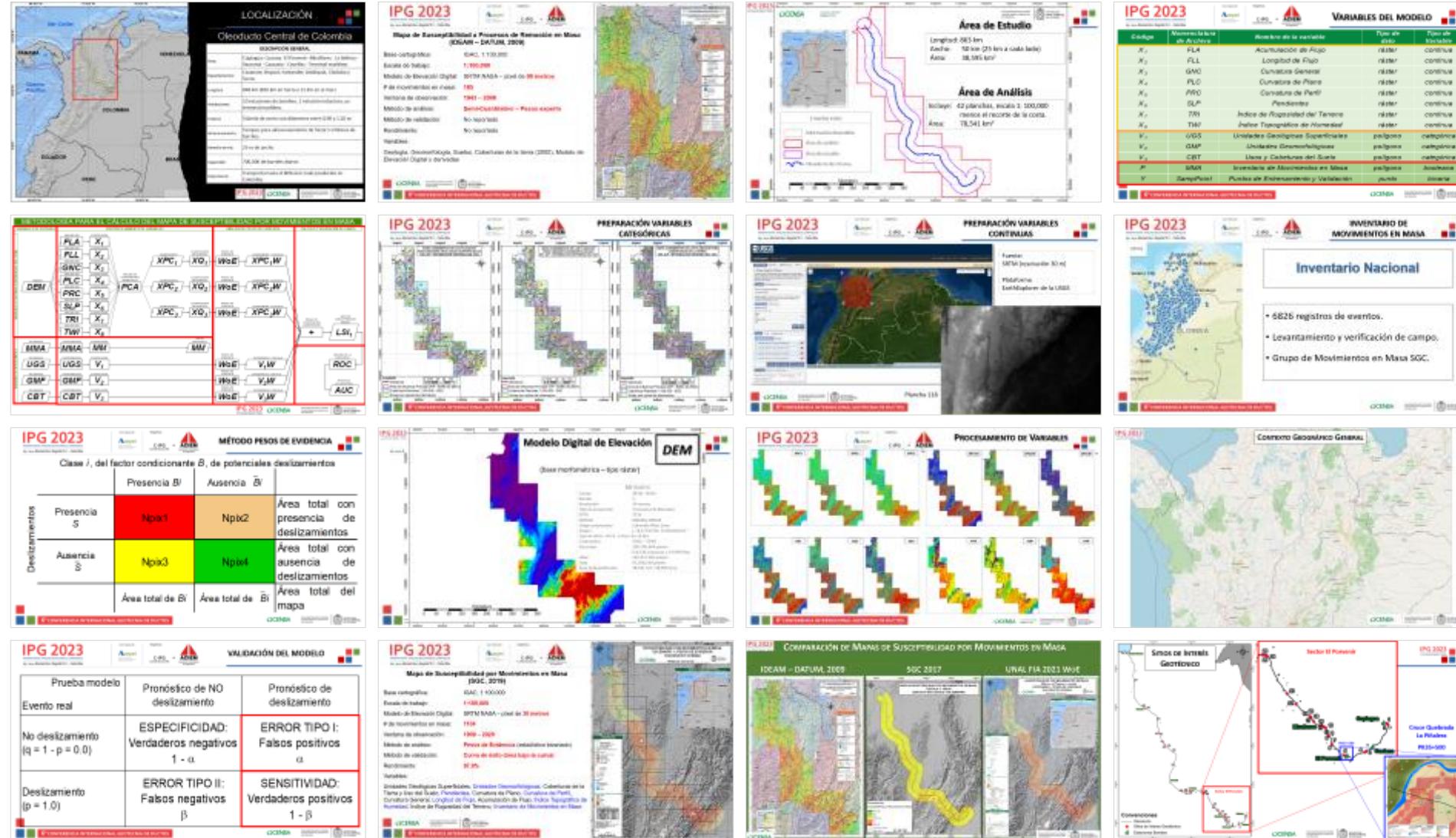


ASOCIACIÓN DE EMPRESAS DE PETRÓLEO, GAS Y ENERGÍA RENOVABLE DE AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

Organiza:

C-IPG
Comité Técnico IPG

ACIEM
Asociación Colombiana de Ingenieros



6^a CONFERENCIA INTERNACIONAL GEOTECNIA DE DUCTOS

OCENSA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

LOCALIZACIÓN



Oleoducto Central de Colombia

DESCRIPCIÓN GENERAL

Ruta:	Cupiagua- Cusiana -El Porvenir -Miraflores - La Belleza - Vasconia - Caucasia - Coveñas - Terminal marítimo
Departamentos:	Casanare, Boyacá, Santander, Antioquia, Córdoba y Sucre.
Longitud:	848 km (836 km en tierra y 12 km en el mar)
Instalaciones:	10 estaciones de bombeo, 1 estación reductora, un terminal marítimo.
Tubería:	Tubería de acero con diámetros entre 0.90 y 1.20 m
Almacenamiento:	Tanques para almacenamiento de hasta 5 millones de barriles
Derecho de vía:	25 m de ancho
Capacidad:	700,000 de barriles diarios
Importancia:	Transporta hasta el 80% del crudo producido en Colombia



Mapa de Susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa (IDEAM – DATUM, 2009)

Base cartográfica: IGAC, 1:100,000

Escala de trabajo: **1:100,000**

Modelo de Elevación Digital: SRTM NASA – píxel de **90 metros**

de movimientos en masa: **185**

Ventana de observación: **1943 – 2006**

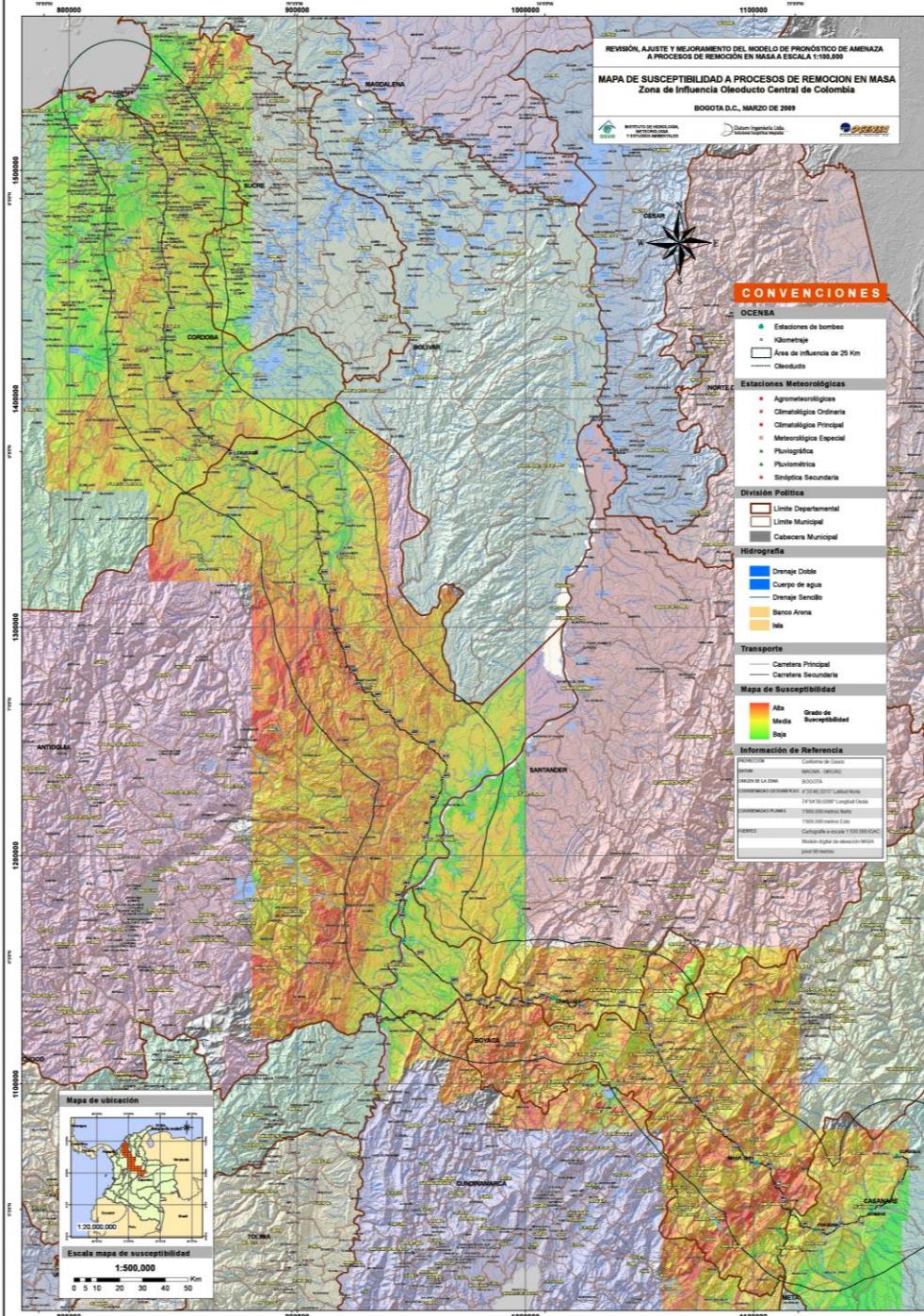
Método de análisis: **Semi-Cuantitativo – Pesos experto**

Método de validación: No reportado

Rendimiento: No reportado

Variables:

Geología, Geomorfología, Suelos, Coberturas de la tierra (2000); Modelo de Elevación Digital y derivadas



Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa (SGC, 2019)

Base cartográfica: IGAC, 1:100,000

Escala de trabajo: **1:100,000**

Modelo de Elevación Digital: SRTM NASA – píxel de **90 metros**

de movimientos en masa: **890**

Ventana de observación: **1909 – 2014**

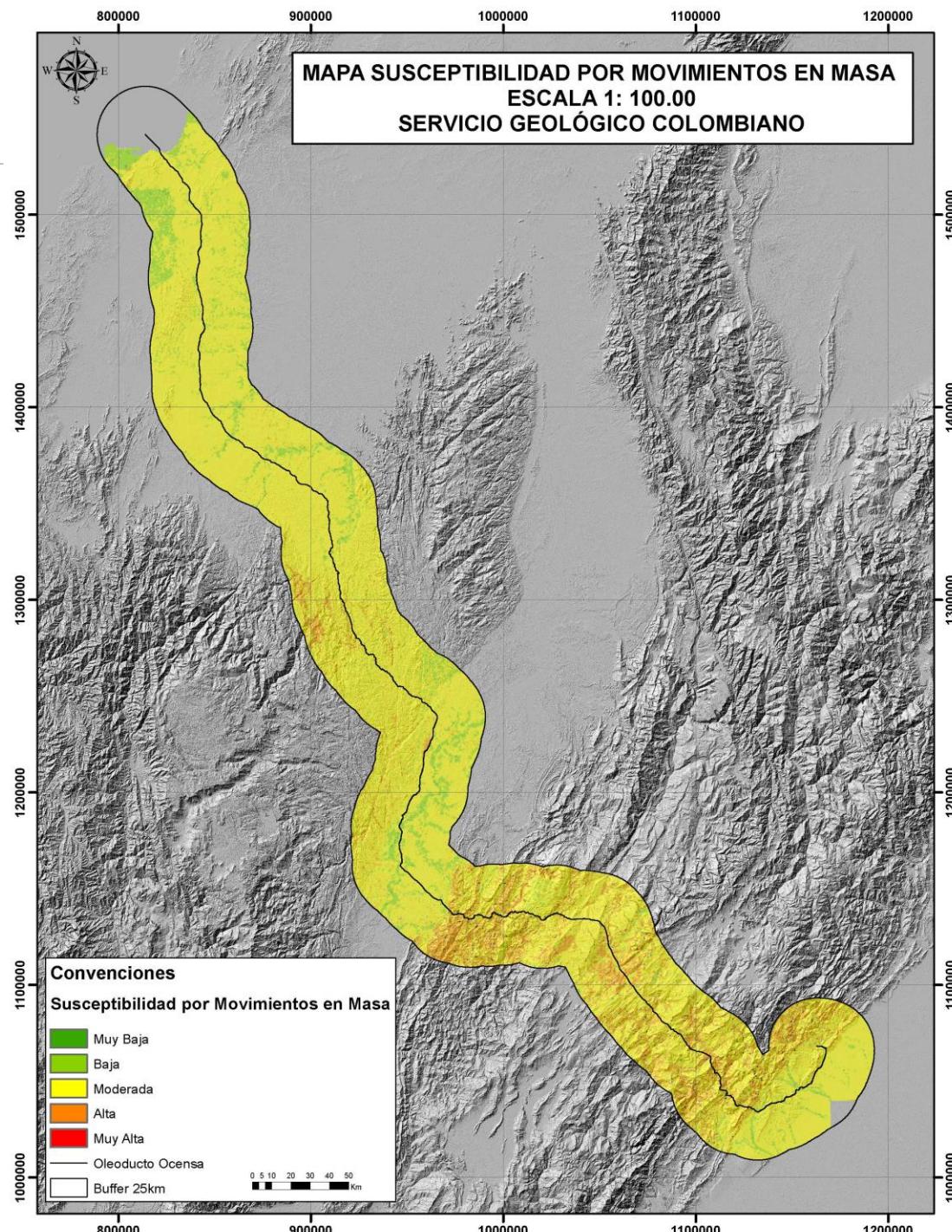
Método de análisis: **Pesos de Evidencia** (estadístico bivariado)

Método de validación: **Curva de éxito (área bajo la curva)**

Rendimiento: **> 70%**

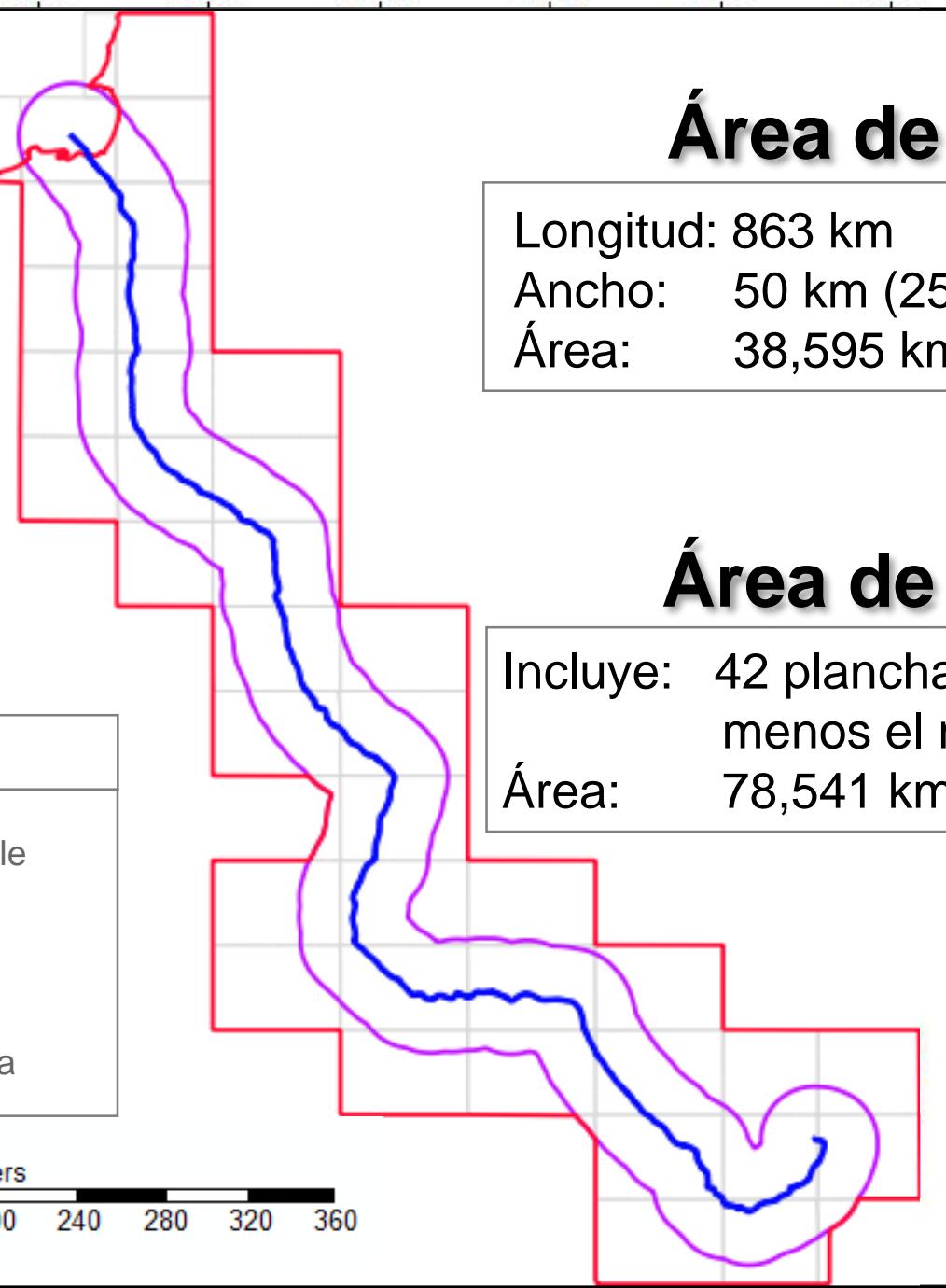
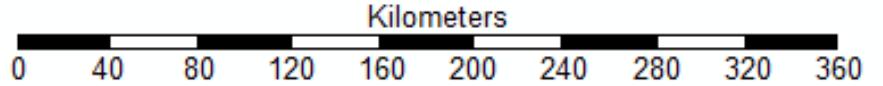
Variables:

Unidades Geológicas Superficiales, Unidades Geomorfológicas, Coberturas de la Tierra y Uso del Suelo, Curvatura, Pendiente e Inventario de Movimientos en Masa





CONVENCIONES	
	Información disponible
	Área de análisis
	Área de estudio
	Oleoducto de Ocensa



Área de Estudio

Longitud: 863 km
Ancho: 50 km (25 km a cada lado)
Área: 38,595 km²

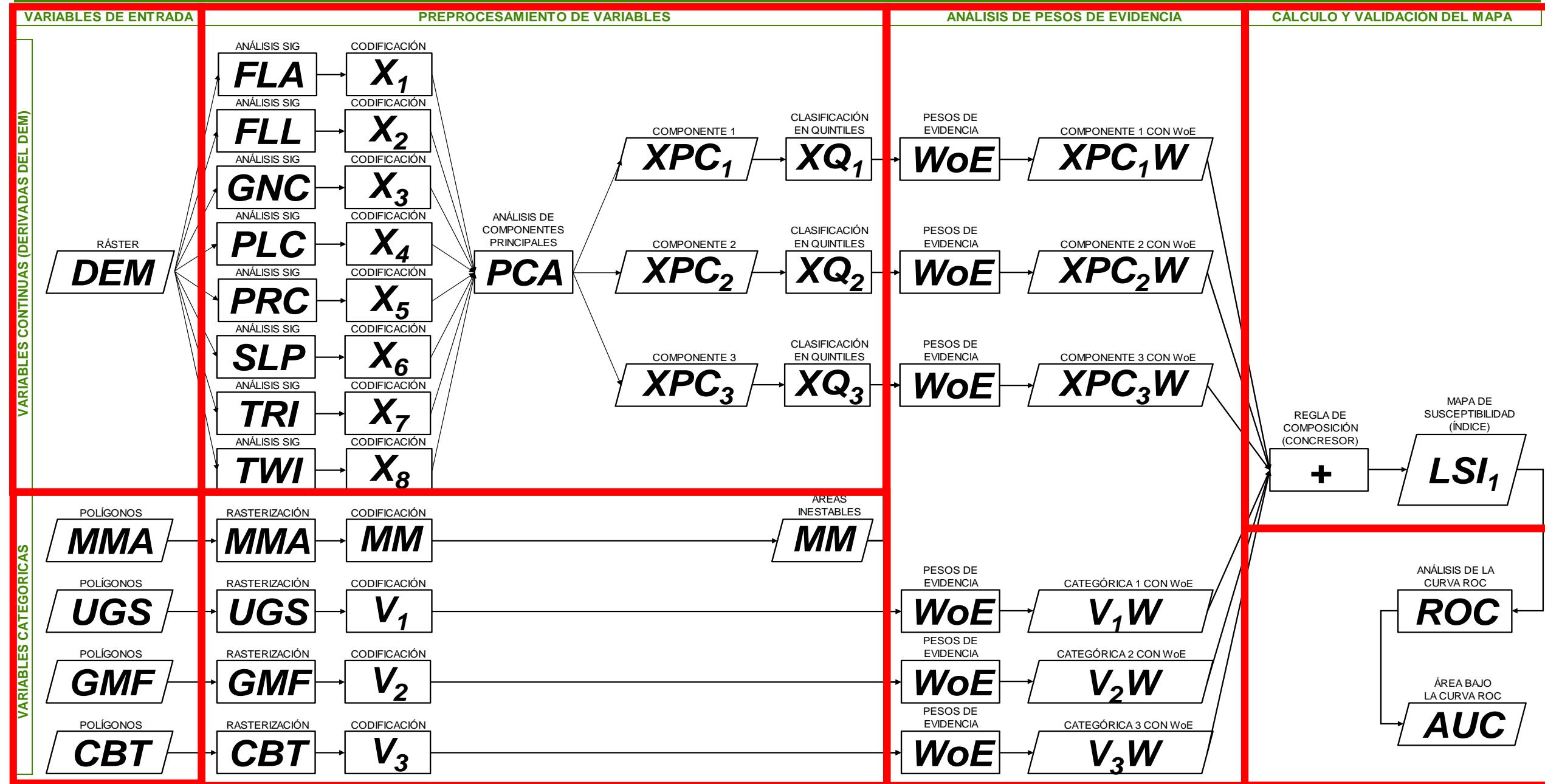
Área de Análisis

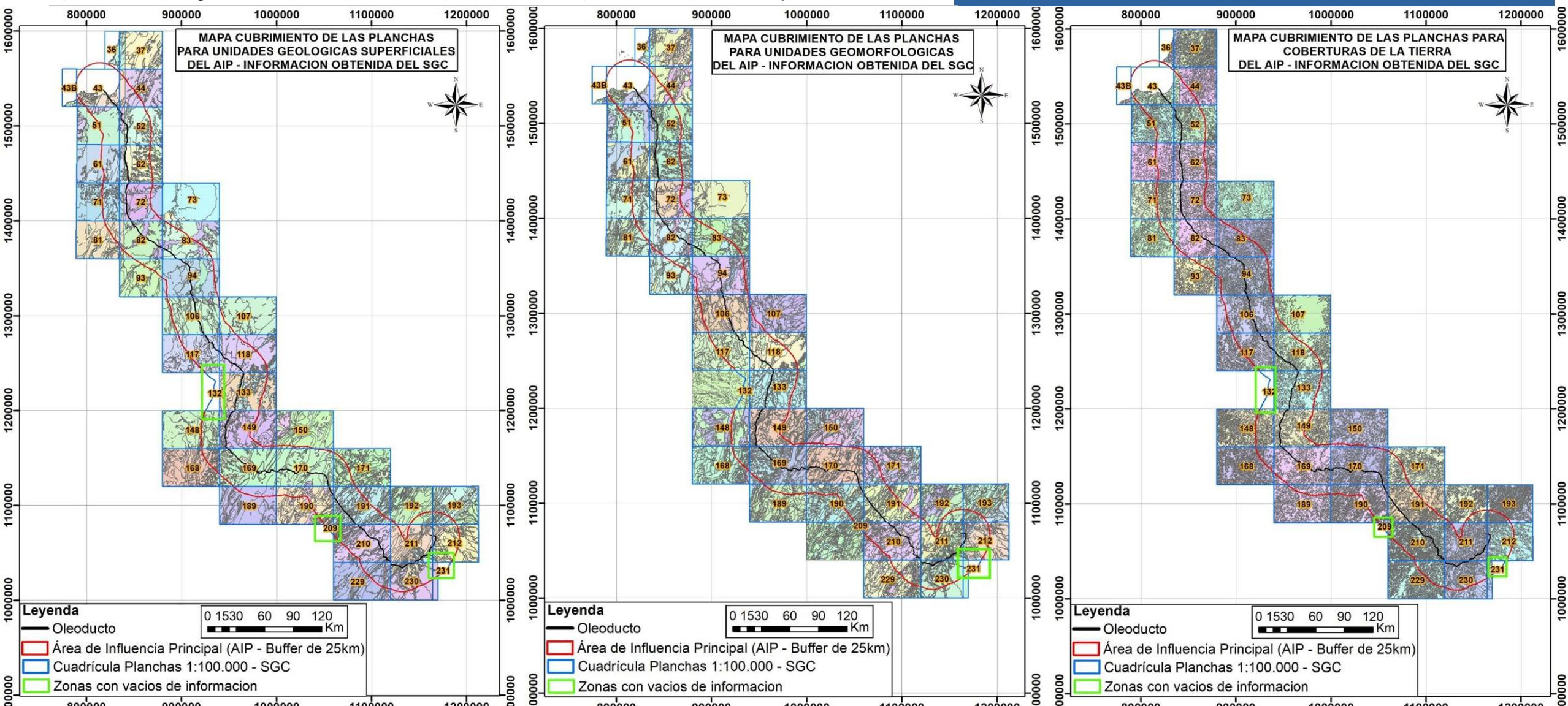
Incluye: 42 planchas, escala 1: 100,000
menos el recorte de la costa.
Área: 78,541 km²



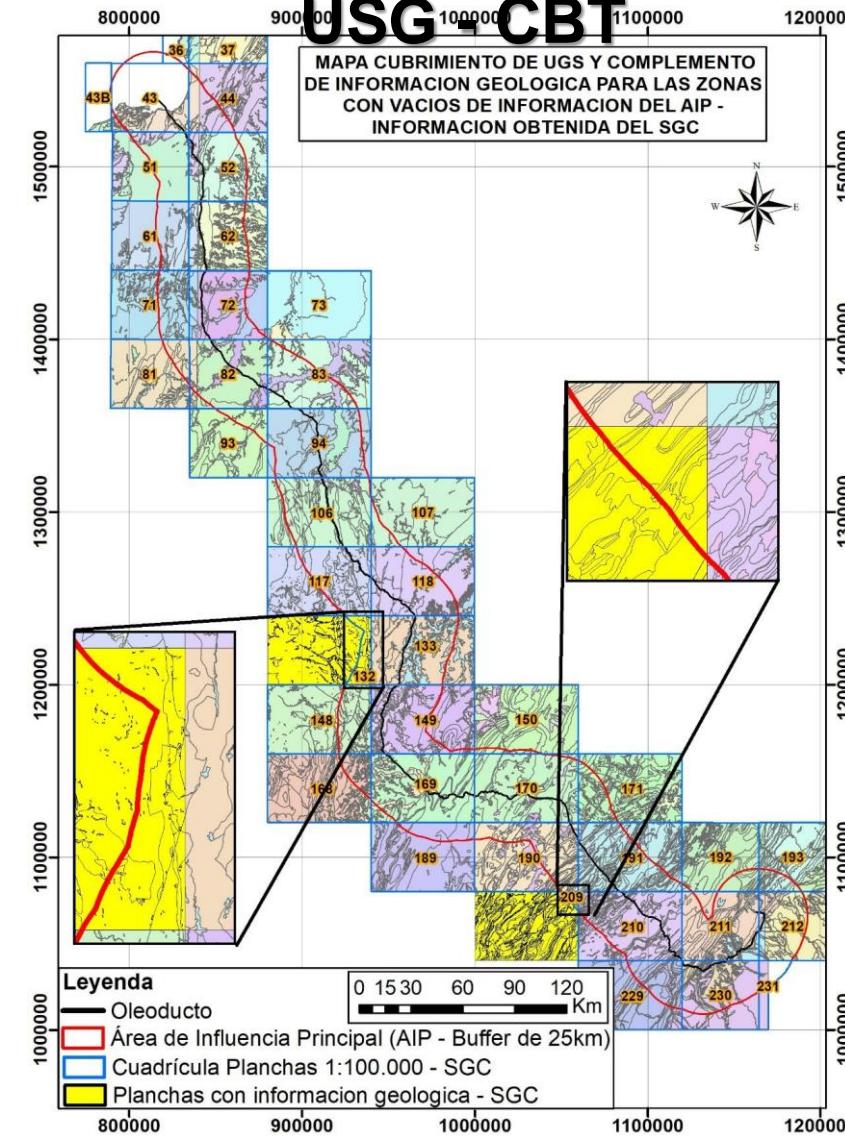
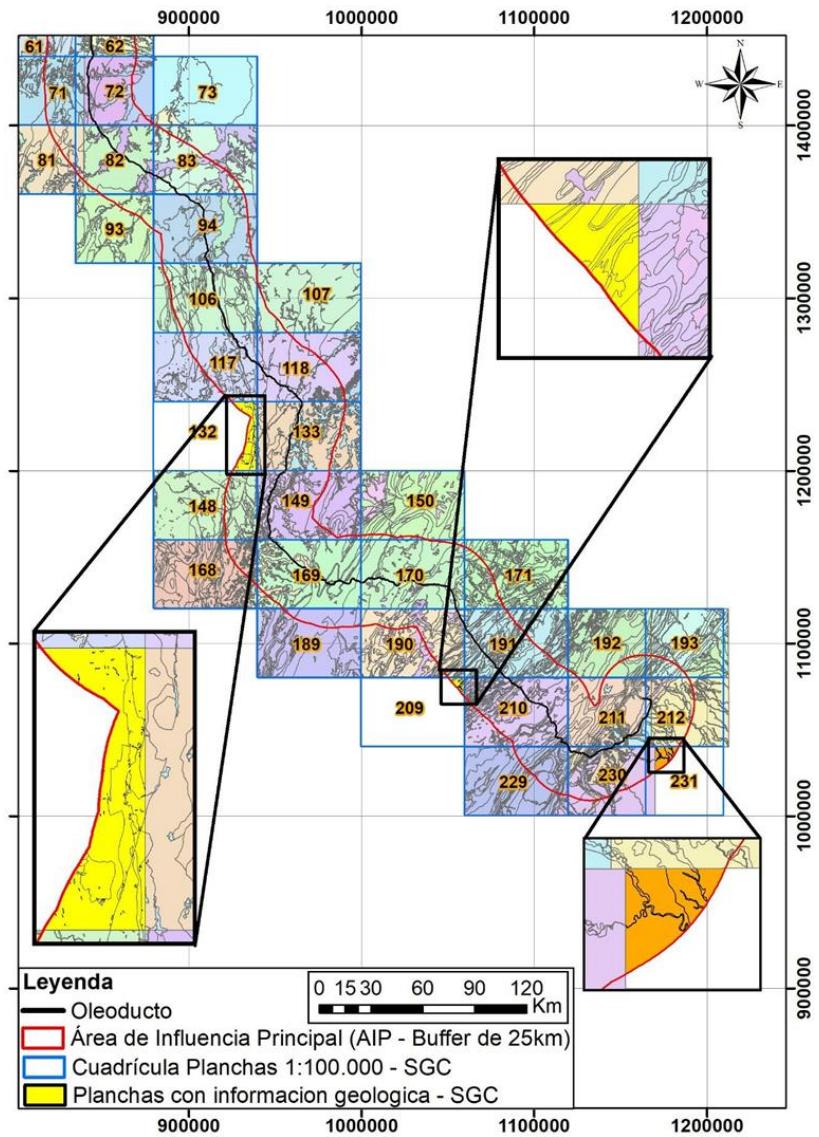
Código	Nomenclatura de Archivo	Nombre de la variable	Tipo de dato	Tipo de Variable
X_1	FLA	Acumulación de Flujo	ráster	continua
X_2	FLL	Longitud de Flujo	ráster	continua
X_3	GNC	Curvatura General	ráster	continua
X_4	PLC	Curvatura de Plano	ráster	continua
X_5	PRC	Curvatura de Perfil	ráster	continua
X_6	SLP	Pendientes	ráster	continua
X_7	TRI	Índice de Rugosidad del Terreno	ráster	continua
X_8	TWI	Índice Topográfico de Humedad	ráster	continua
V_1	UGS	Unidades Geológicas Superficiales	polígono	categórica
V_2	GMF	Unidades Geomorfológicas	polígono	categórica
V_3	CBT	Usos y Coberturas del Suelo	polígono	categórica
P	MMA	Inventario de Movimientos en Masa	polígono	booleana
Y	SampPoint	Puntos de Entrenamiento y Validación	punto	binaria

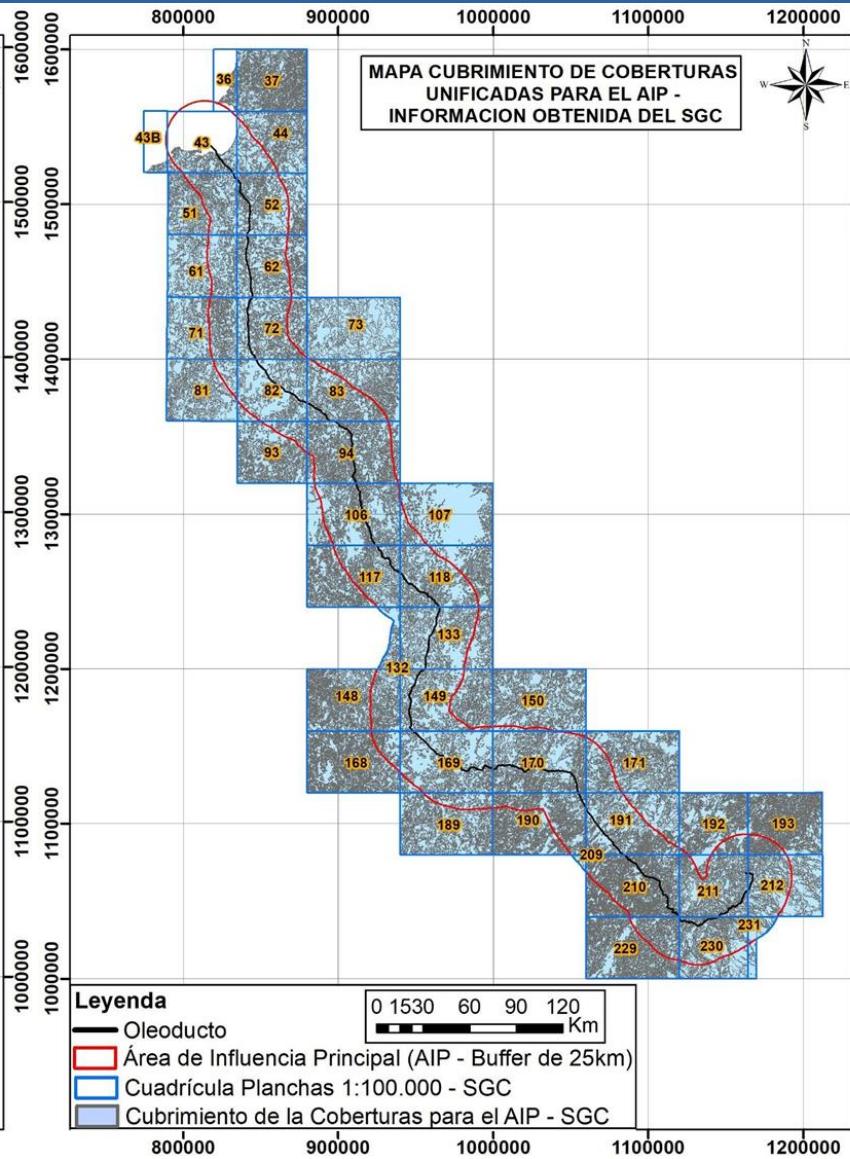
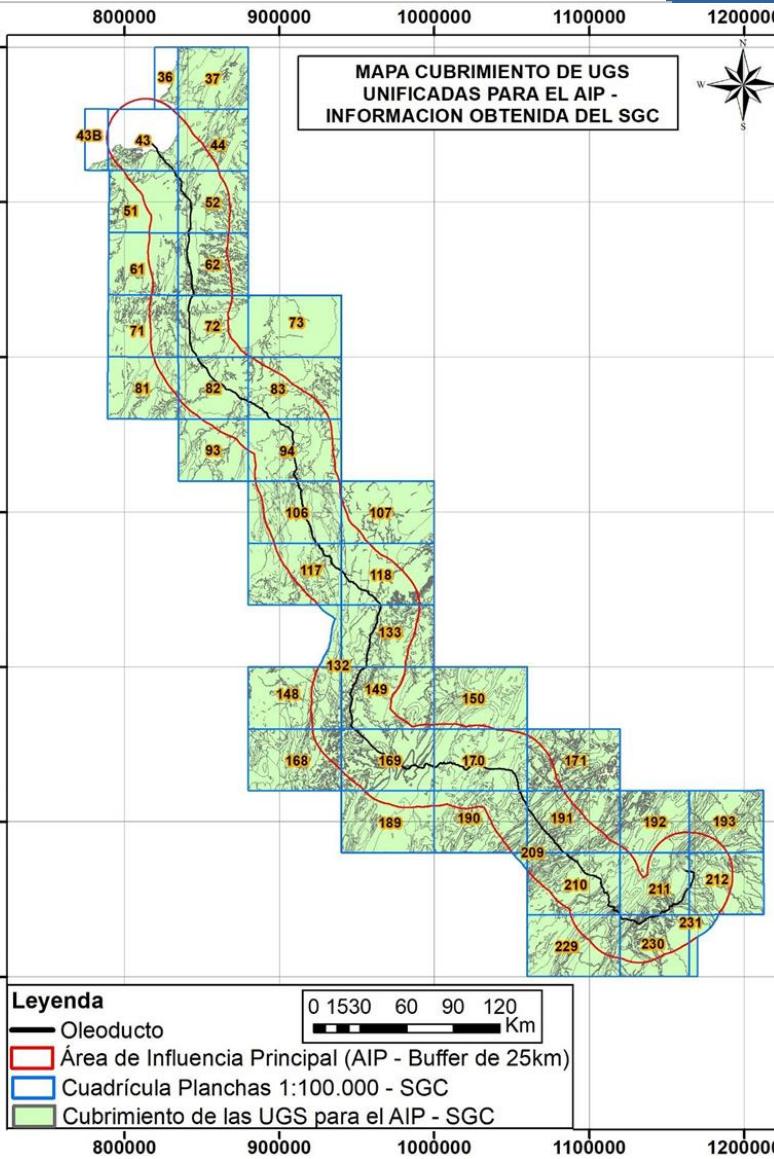
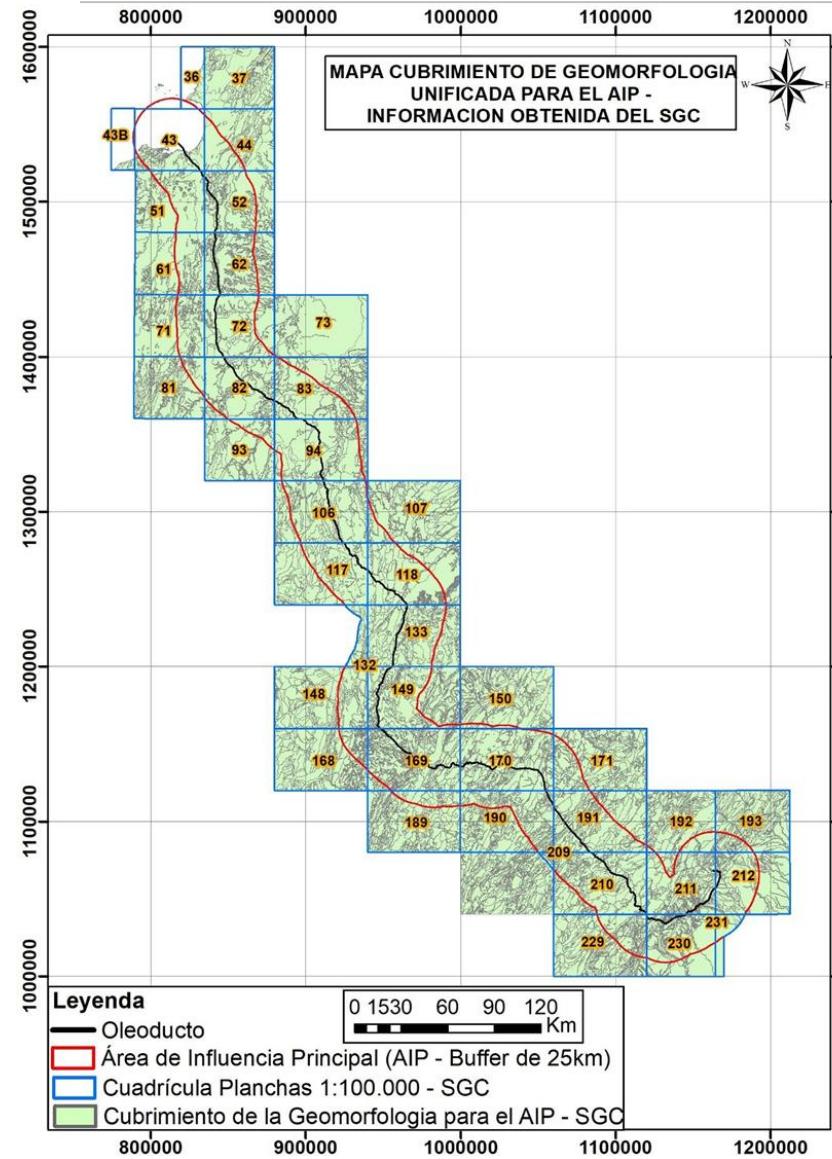
METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

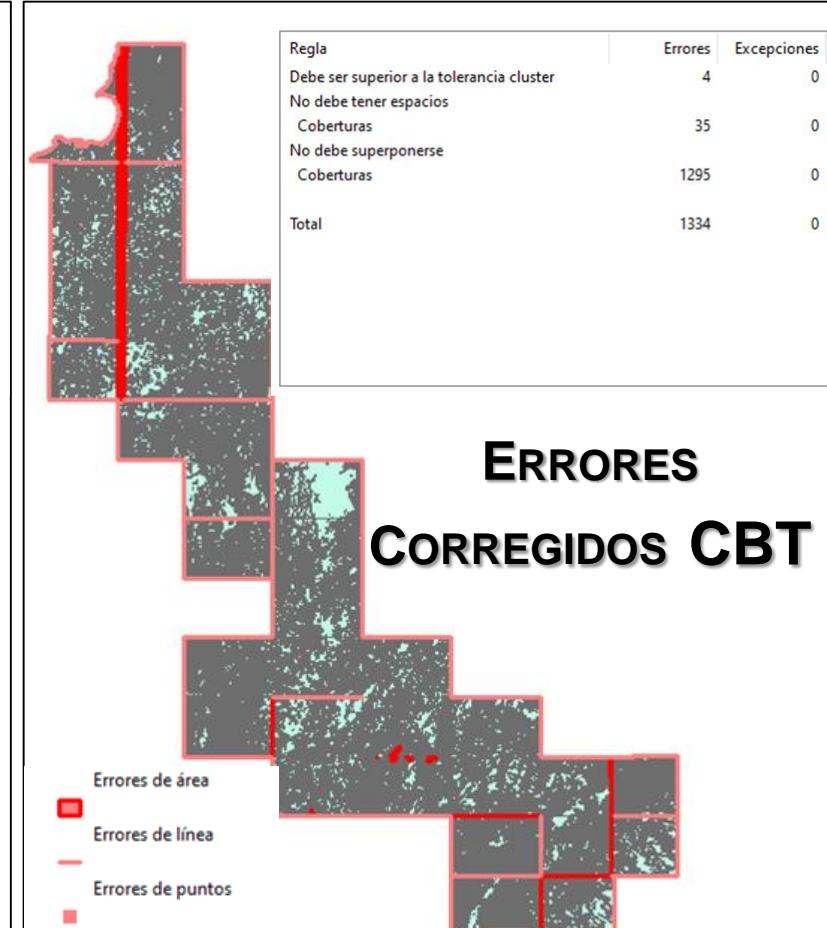
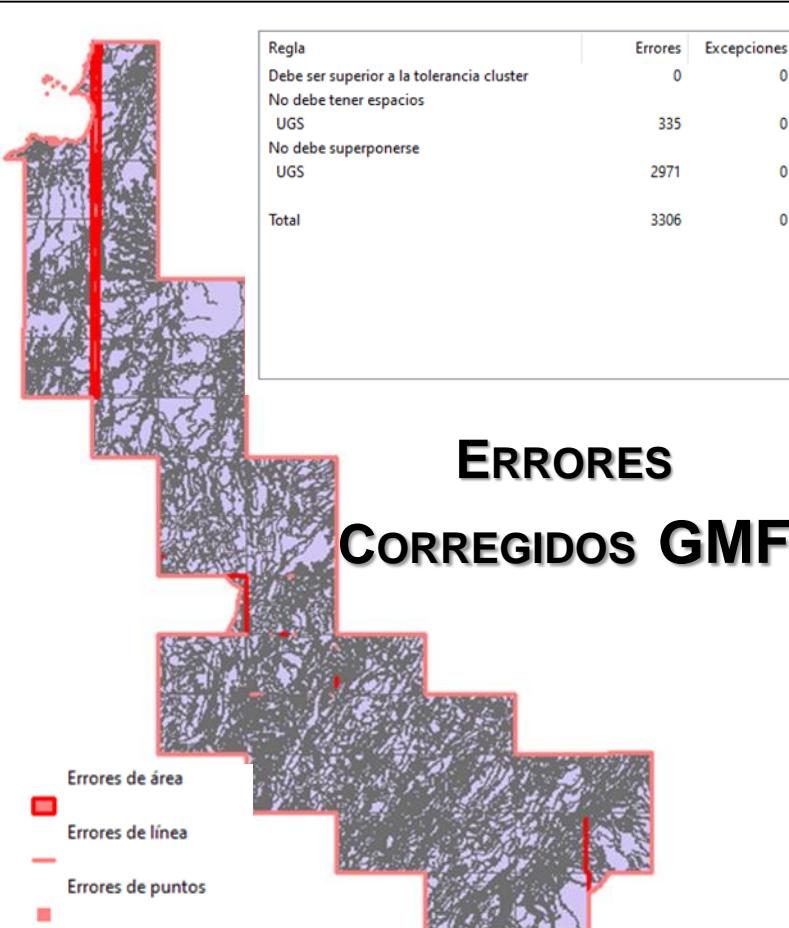
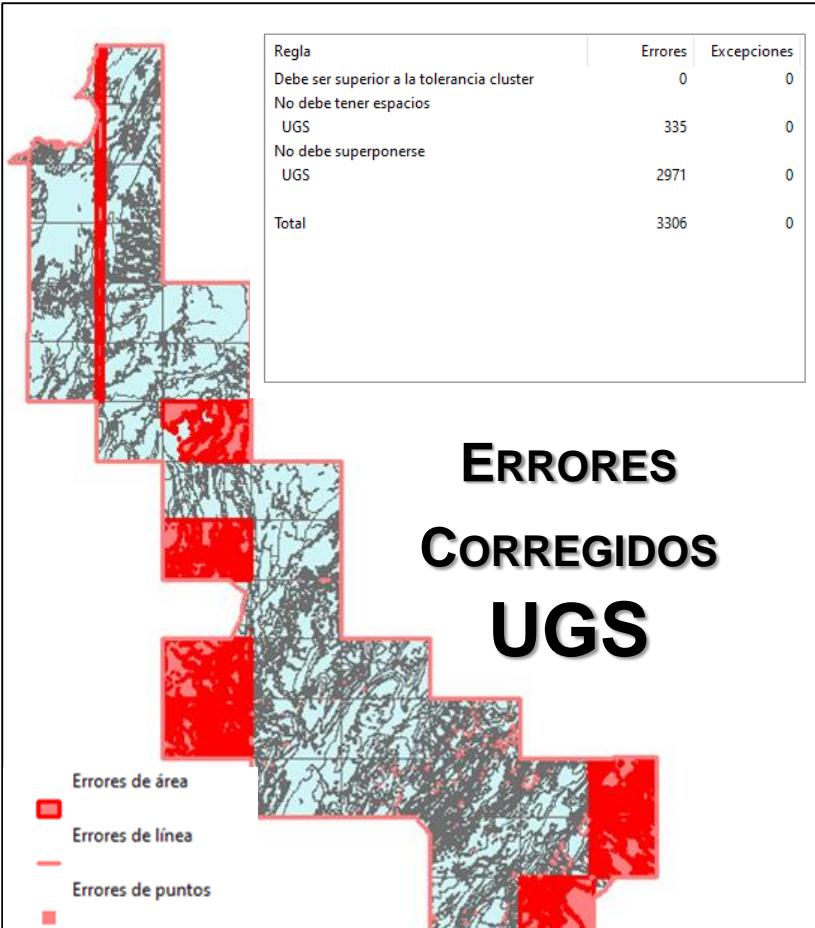




COMPLETADO DE INFORMACIÓN FALTANTE:









EarthExplorer Manage Criteria

Search Criteria Data Sets Additional Criteria Results

1. Enter Search Criteria

To narrow your search area, type in an address or place name, enter coordinates or click the map to define your search area (for advanced map tools, view the help documentation), and/or choose a date range.

Search Criteria Summary (Show)

Search Results: 0 items

Select a Geocoding Method: Feature (GNIS)

Search Limits: The search result limit is 100 records; select a County, Feature Class, and/or Feature Type to reduce your chance of exceeding this limit.

Map Features World Features

Feature Name: (use % as wildcard)

State: All

Feature Type: All

Show Clear

Polygons: Create, Circle, Predefined Area

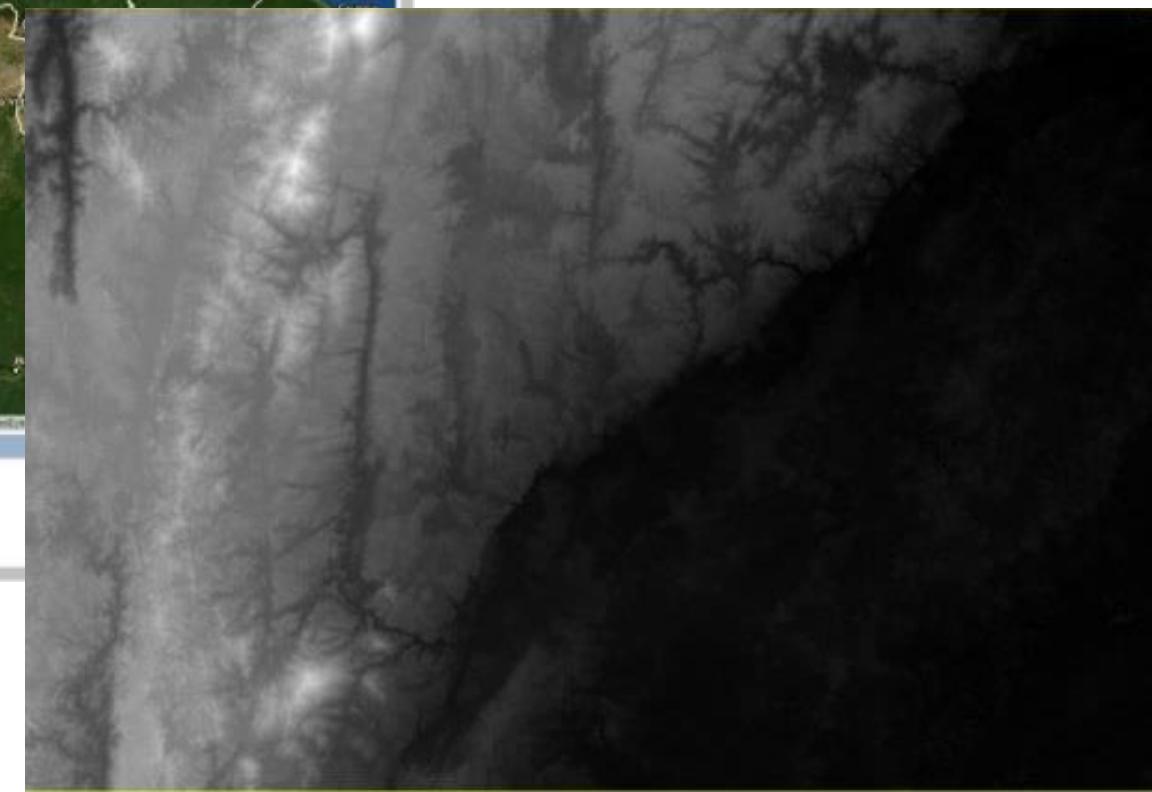
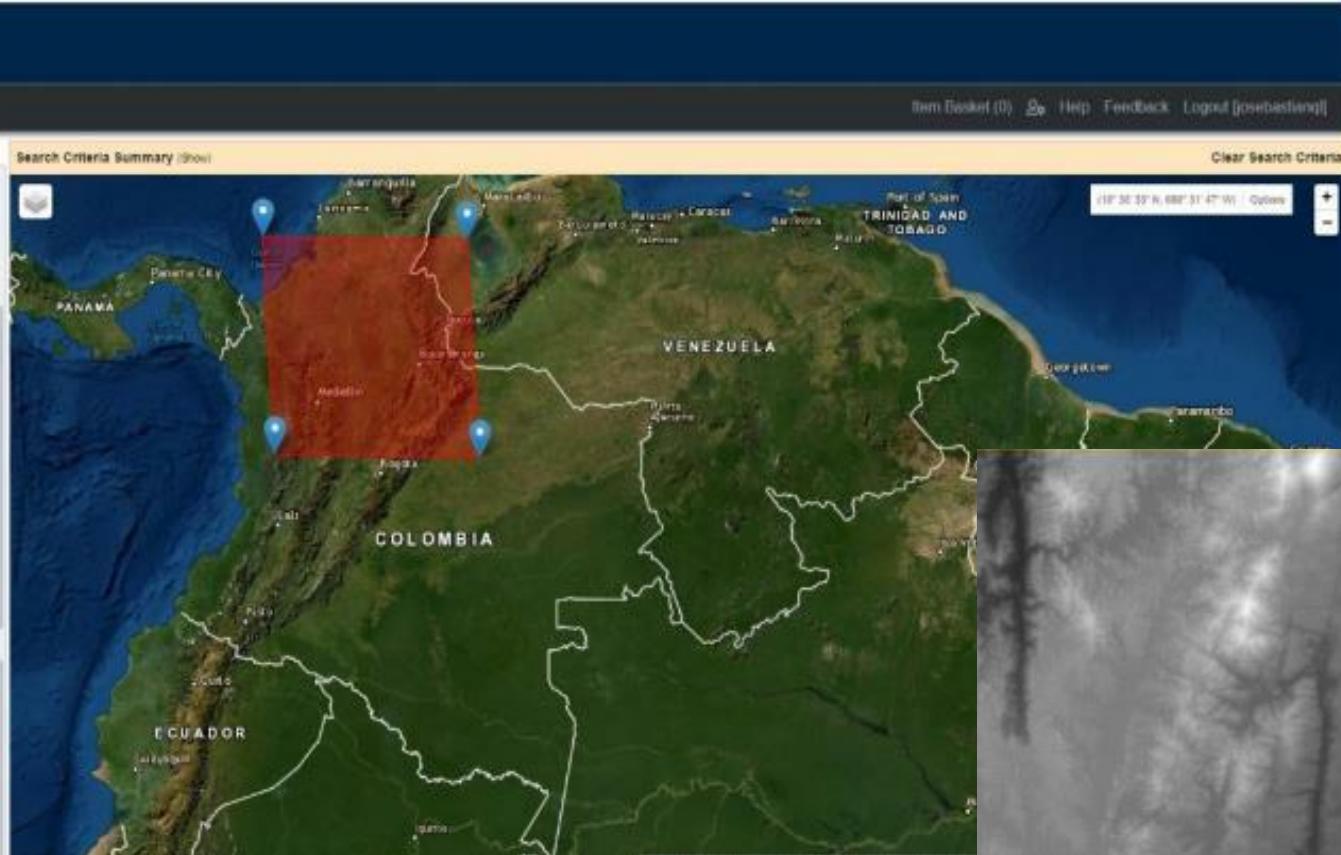
Coordinates: Decimal

1. Lat: 09° 09' 25" N, Lon: 078° 52' 96" W ✓ X
2. Lat: 09° 59' 32" N, Lon: 072° 00' 15" W ✓ X
3. Lat: 04° 57' 34" N, Lon: 071° 41' 48" W ✓ X
4. Lat: 05° 02' 49" N, Lon: 076° 35' 48" W ✓ X

Use Map, AIM Coordinates, Clear Coordinates

Date Range: Cloud Cover: Result Options

Search from: mmddyyyy to: mmddyyyy
Search months: All

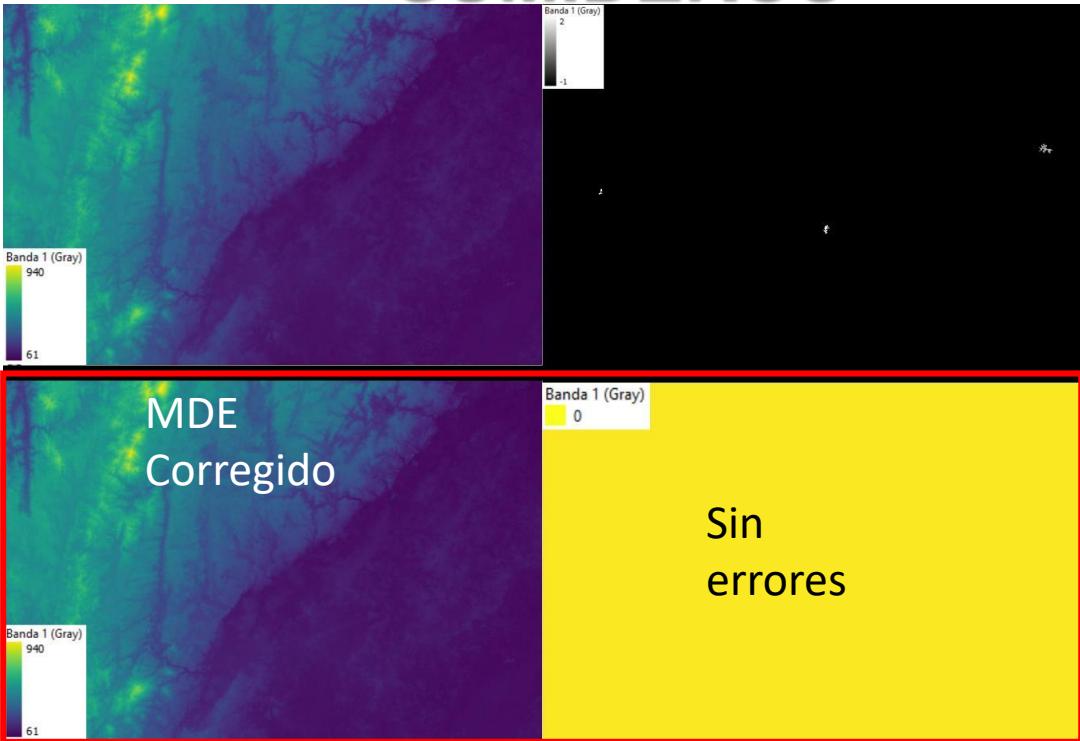
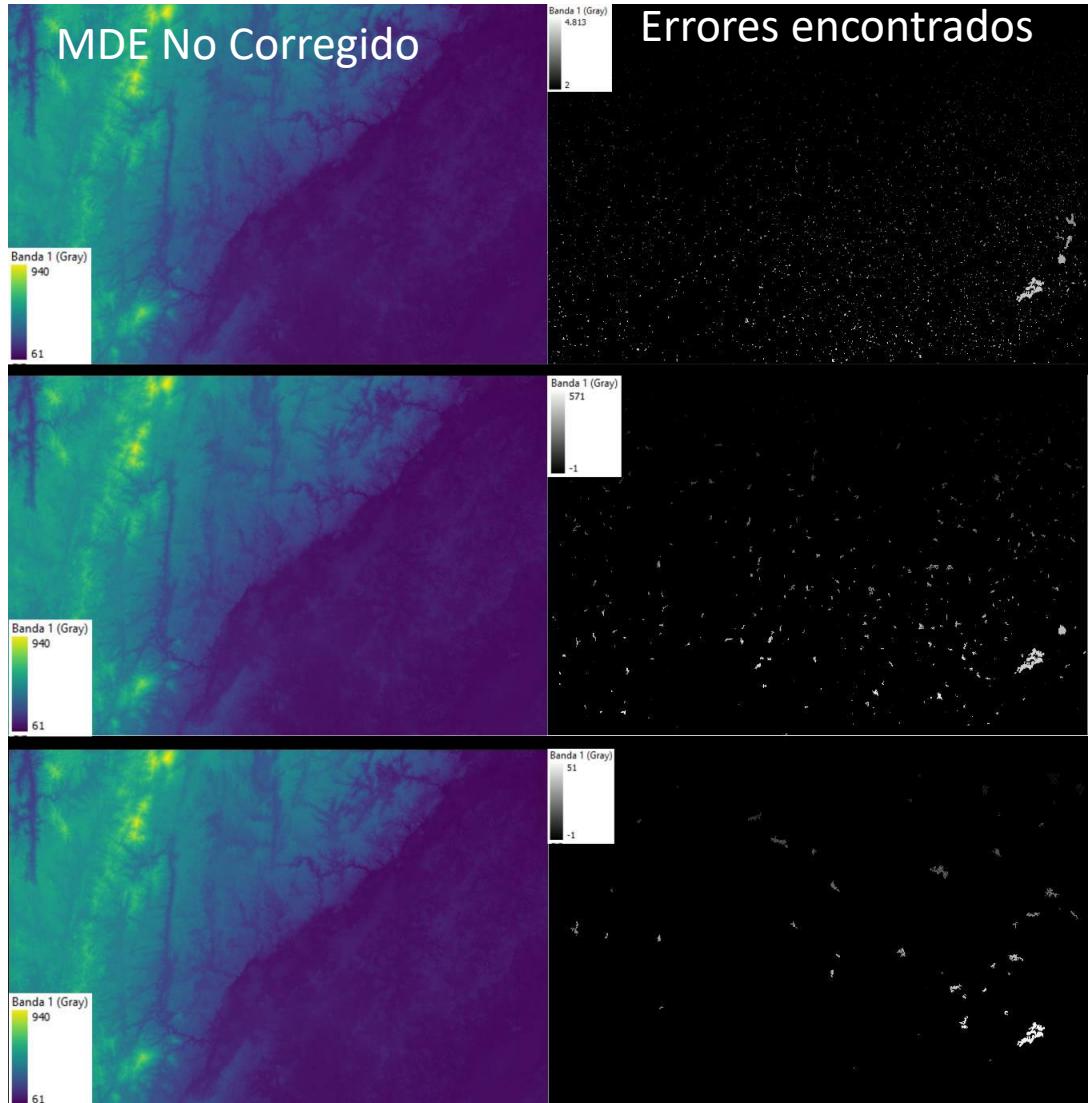


Fuente:
SRTM (resolución 30 m)

Plataforma
EarthExplorer de la USGS



CORRECCIÓN SUMIDEROS



Ejemplo Plancha 118



INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA

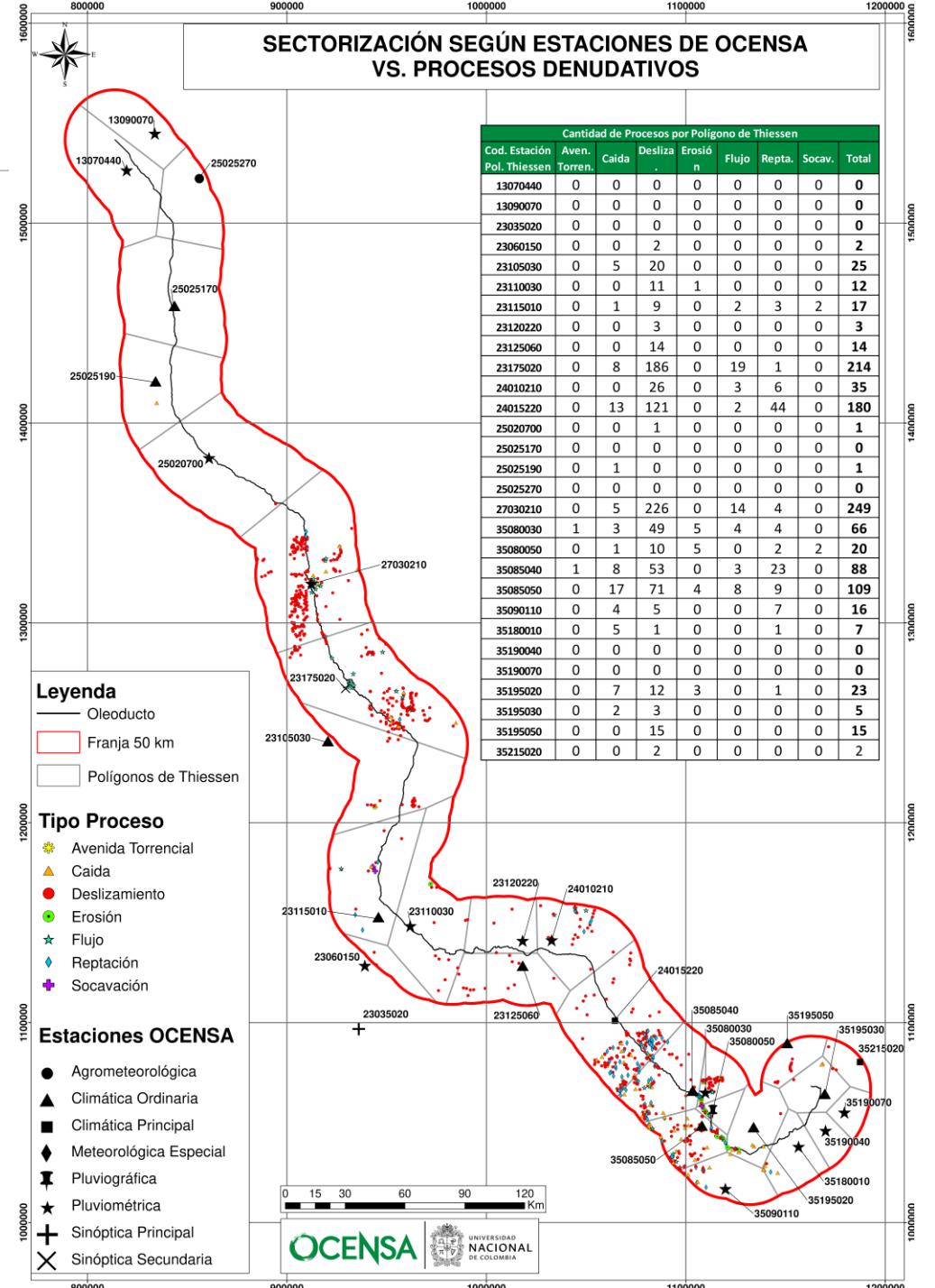


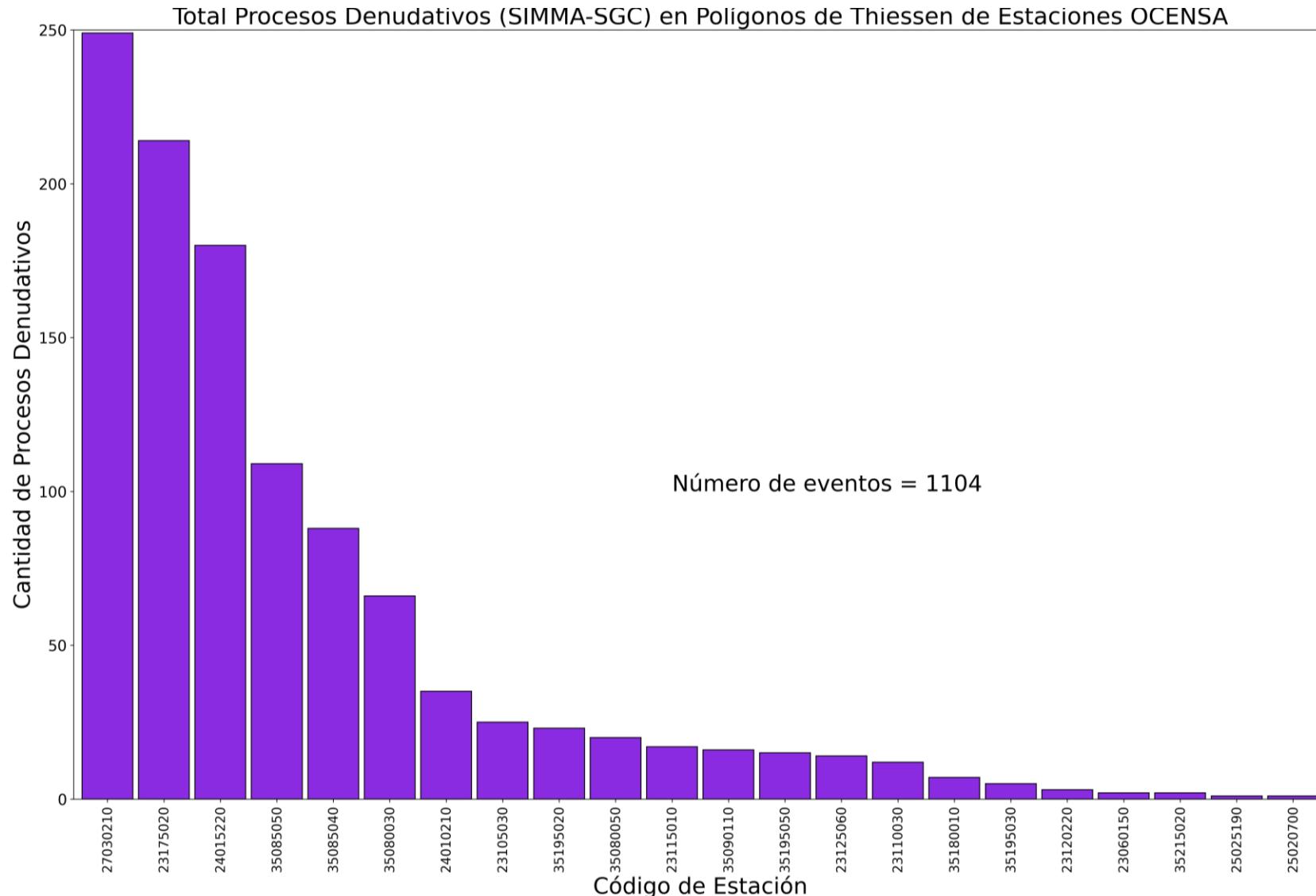
Inventario Nacional

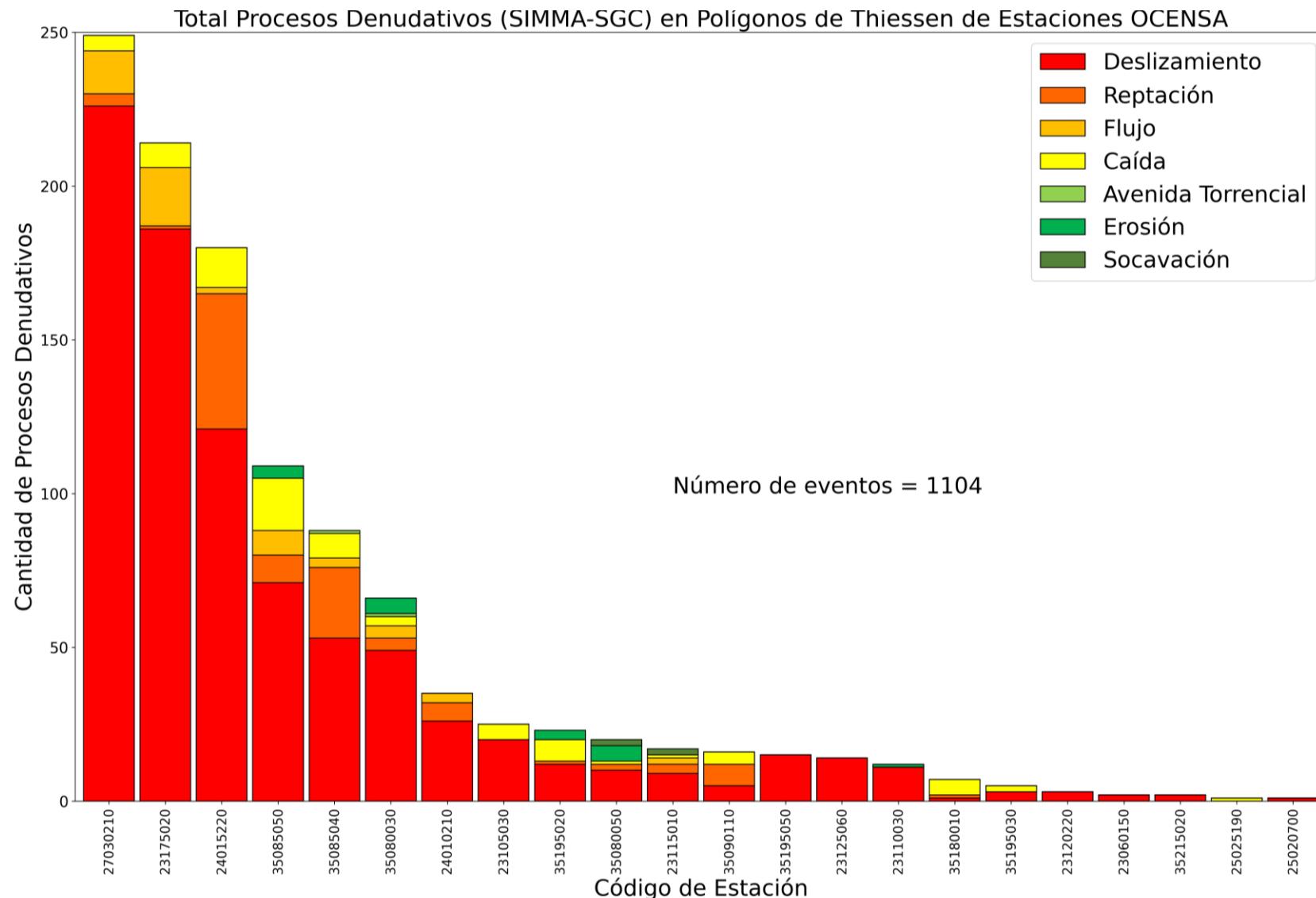
- 6826 registros de eventos.
- Levantamiento y verificación de campo.
- Grupo de Movimientos en Masa SGC.

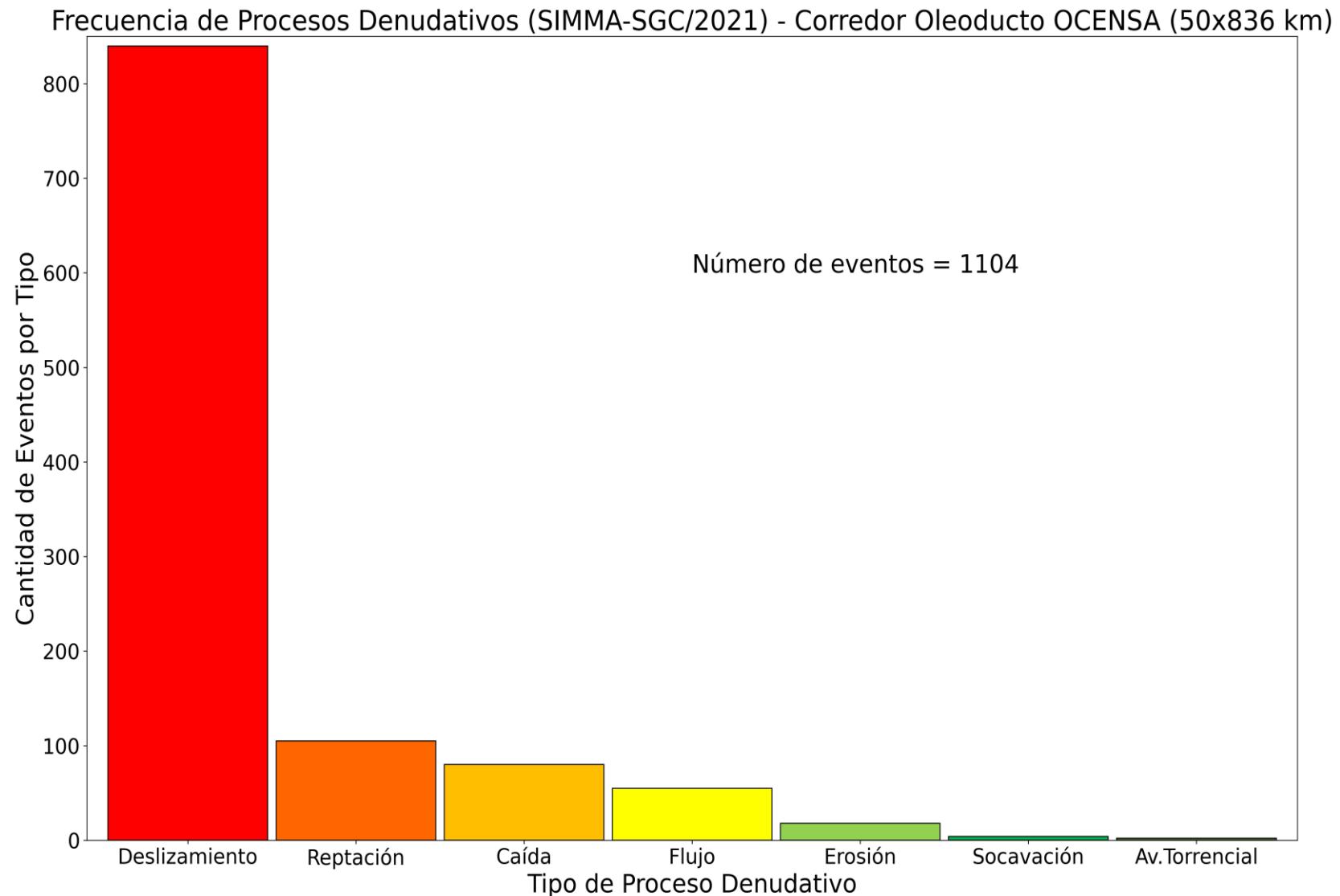


Movimientos en Masa en el Área de influencia 1104 eventos







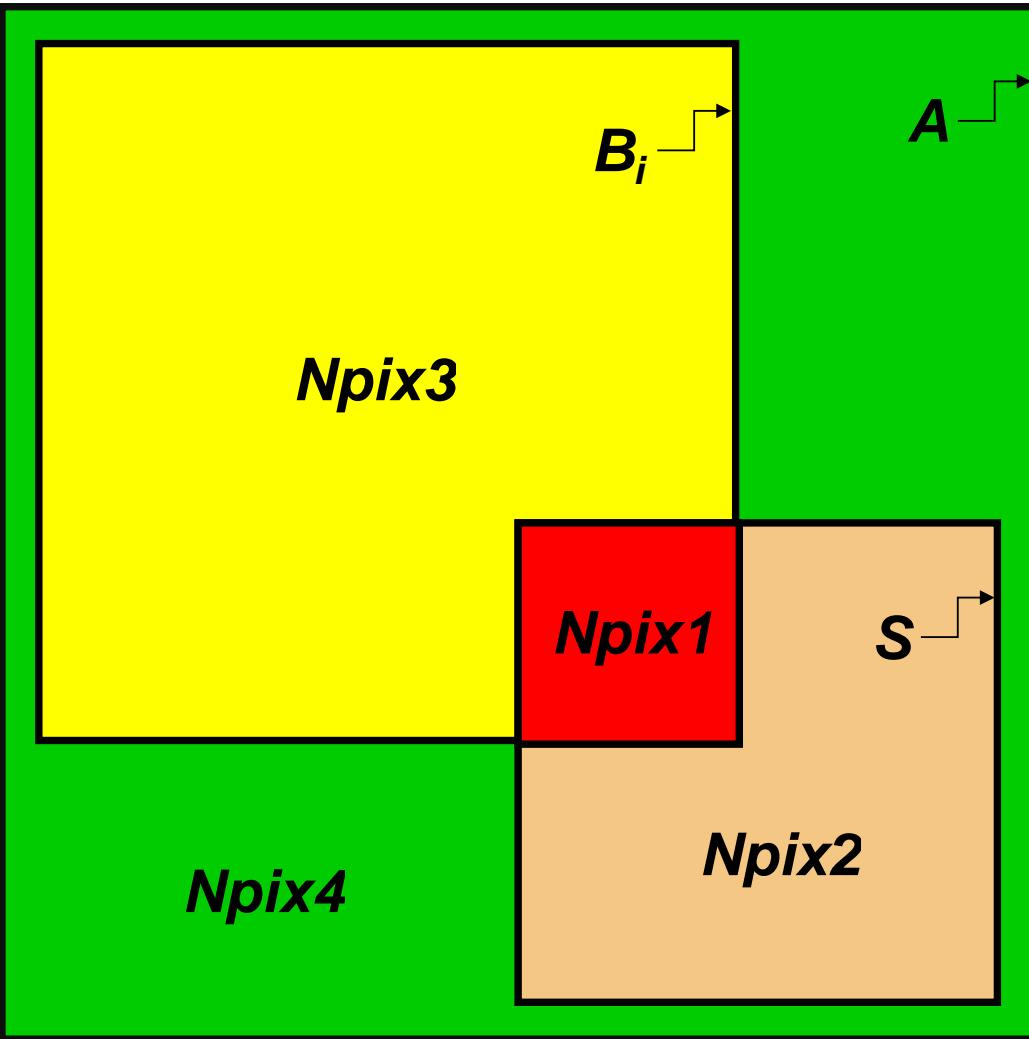




Clase i , del factor condicionante B , de potenciales deslizamientos

		Presencia B_i	Ausencia \bar{B}_i	
Deslizamientos	Presencia S	Npix1	Npix2	Área total con presencia de deslizamientos
	Ausencia \bar{S}	Npix3	Npix4	Área total con ausencia de deslizamientos
		Área total de B_i	Área total de \bar{B}_i	Área total del mapa





$$N_{pix}1 = N_{pix}\{S \cap B_i\}$$

$$N_{pix}2 = N_{pix}\{S \cap \bar{B}_i\}$$

$$N_{pix}3 = N_{pix}\{\bar{S} \cap B_i\}$$

$$N_{pix}4 = N_{pix}\{\bar{S} \cap \bar{B}_i\}$$

$$N_{pix}\{S\} = N_{pix}1 + N_{pix}2$$

$$N_{pix}\{\bar{S}\} = N_{pix}3 + N_{pix}4$$

$$N_{pix}\{B_i\} = N_{pix}1 + N_{pix}3$$

$$N_{pix}\{\bar{B}_i\} = N_{pix}2 + N_{pix}4$$

$$N_{pix}\{B_i \cup \bar{B}_i\} = N_{pix}\{S \cup \bar{S}\} = N_{pix}1 + N_{pix}2 + N_{pix}3 + N_{pix}4$$





Según van Westen (2002), , en términos de píxeles:

$$W_{B_i}^+ = \log_e \left[\frac{N_{pix}^1}{\frac{N_{pix}^1 + N_{pix}^2}{\frac{N_{pix}^3}{N_{pix}^3 + N_{pix}^4}}} \right]$$

$$W_{B_i}^- = \log_e \left[\frac{N_{pix}^2}{\frac{N_{pix}^1 + N_{pix}^2}{\frac{N_{pix}^4}{N_{pix}^3 + N_{pix}^4}}} \right]$$

$$W_{f_i} = W_{B_i}^+ - W_{B_i}^-$$





Interpretación de los pesos de evidencia de factor B de la clase clase i:

Si $W_{B_i}^+ > 0$ La presencia del factor B de la clase i, contribuye a la presencia de deslizamientos.

Indica el grado de correlación directa o el grado de contribución (van Westen, 2002).

Si $W_{B_i}^+ < 0$ La presencia del factor B de la clase i, contribuye a la ausencia de los deslizamientos.

Indica el grado de correlación inversa (van Westen, 2002).

Si $W_{B_i}^+ \approx 0$ La presencia del factor B de la clase i, no muestra relación con los deslizamientos.

No es un factor condicionante de los deslizamientos (van Westen, 2002).

Si $W_{B_i}^- > 0$ La ausencia del factor B de la clase i, contribuye a la presencia de deslizamientos.

Si $W_{B_i}^- < 0$ La ausencia del factor B de la clase i, contribuye a la ausencia de los deslizamientos.

Modelo Digital de Elevación

DEM

(base morfométrica – tipo ráster)

METADATOS

Fuente	SRTM - NASA
Bandas	1
Resolución	30 metros
Tipo de proyección	Transversa de Mercator
EPSG	3116
DATUM	MAGNA-SIRGAS
Origen proyectado	Colombia West Zone
Origen	(-74.07750792, 4.596202417) °
Tipo de datos	Int16 - Entero de 16 bits
Controlador	GDAL – GPKG
Extensión	290,705,464 pixeles (14,536 columnas x 19,999 filas)
nNan	203,437,265 pixeles
Data	87,268,199 pixeles
Área Análisis/Estudio	78,541 m ² / 38,595 km ² ,

Kilometers

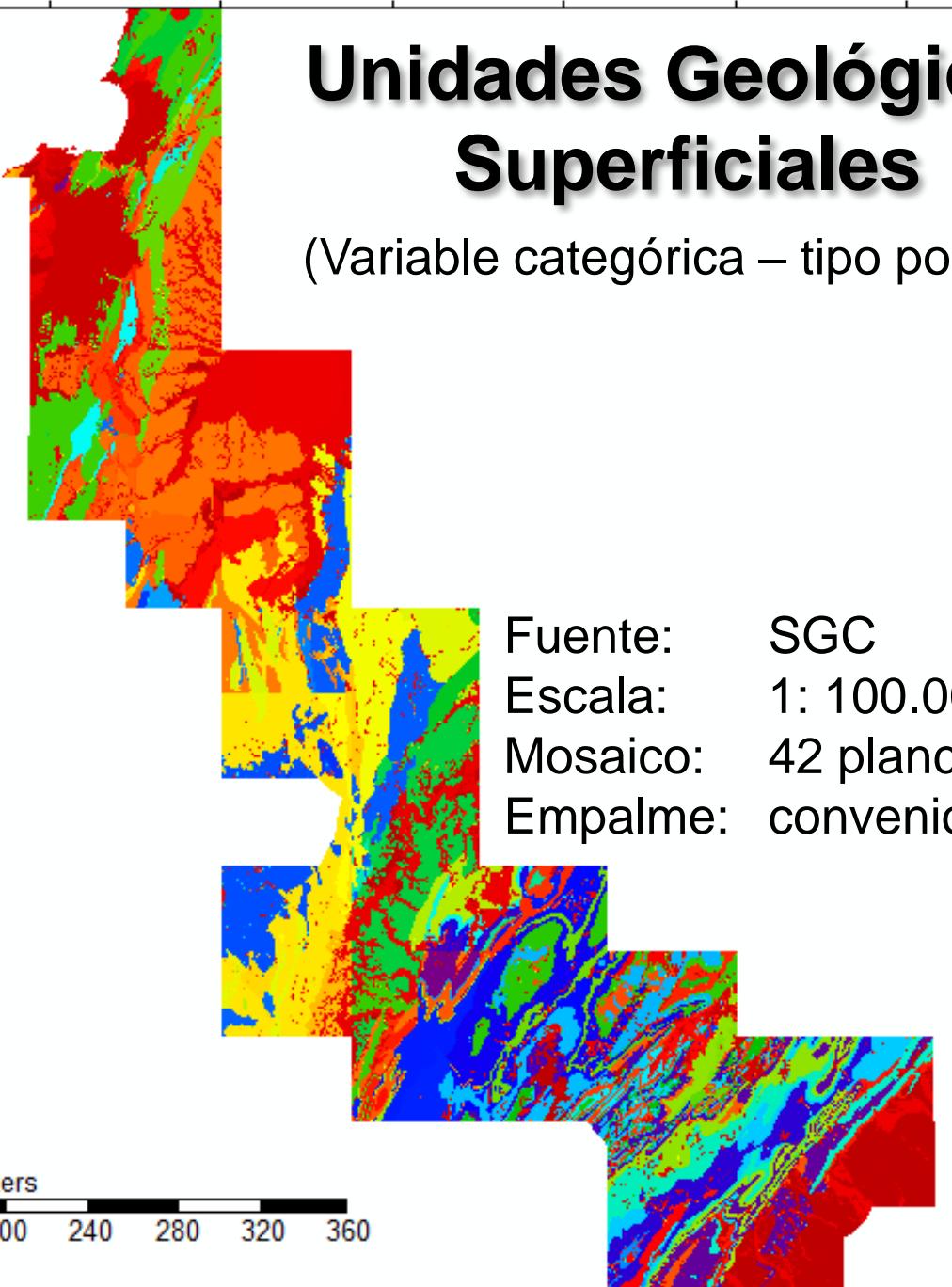
0 40 80 120 160 200 240 280 320 360



OCENSA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales





Unidades Geológicas Superficiales

(Variable categórica – tipo polígono)

V₁

UGS

Fuente: SGC
Escala: 1: 100.000
Mosaico: 42 planchas
Empalme: convenio Ocensa – Unal FIA

V₂

23 y 24 de N

1520000

1440000

1360000

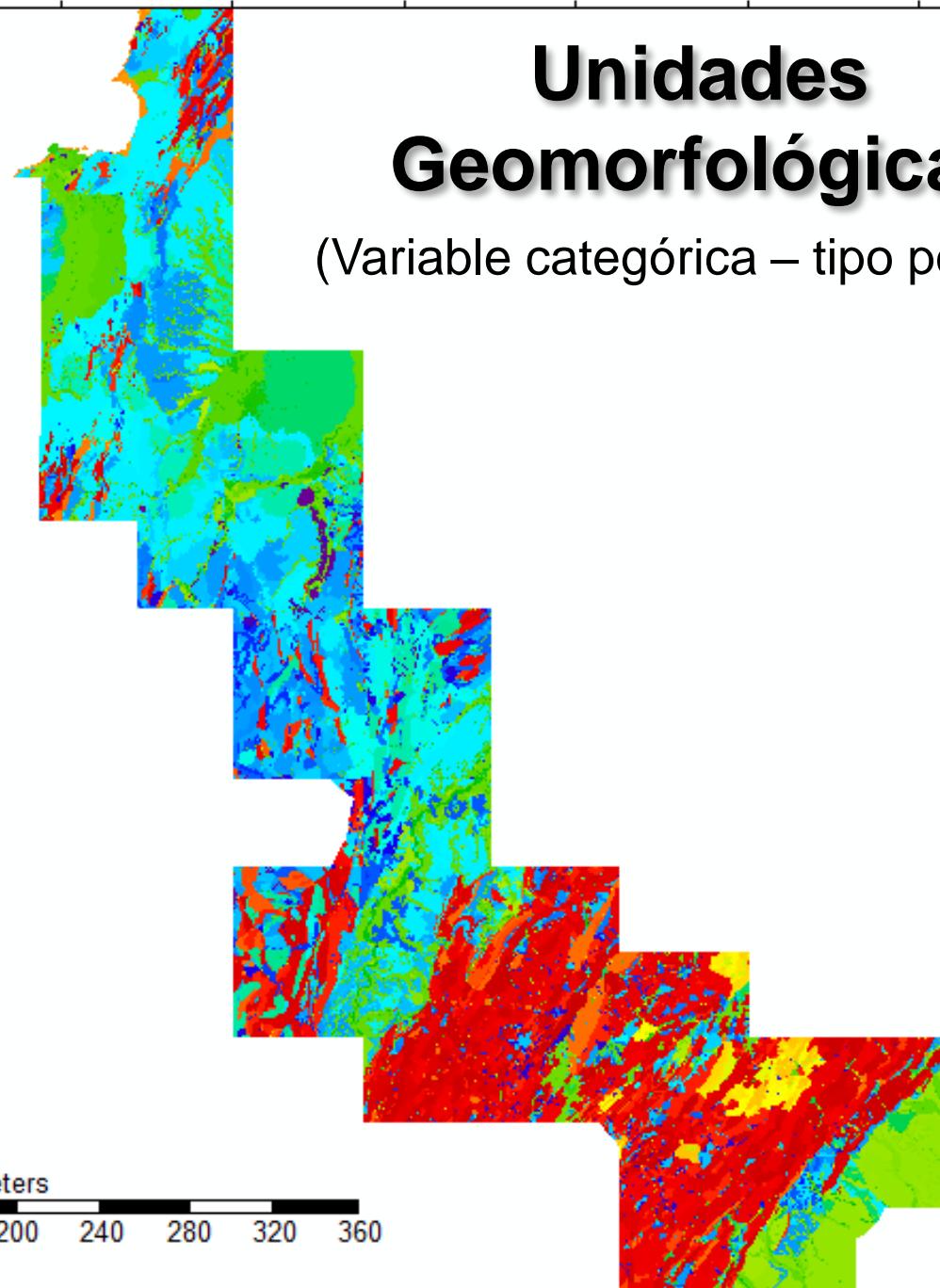
1280000

1200000

1120000

1040000

040000



Unidades Geomorfológicas

(Variable categórica – tipo polígono)

GMF

1520000

1440000

1360000

1280000

1200000

1120000

040000

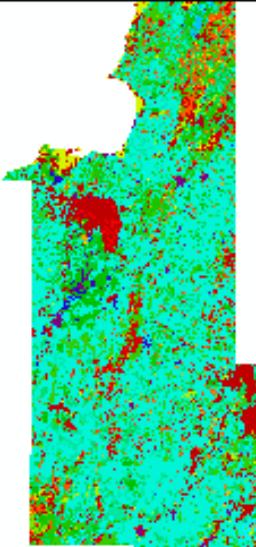
0 40 80 120 160 200 240 280 320 360
Kilometers

OCENSA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

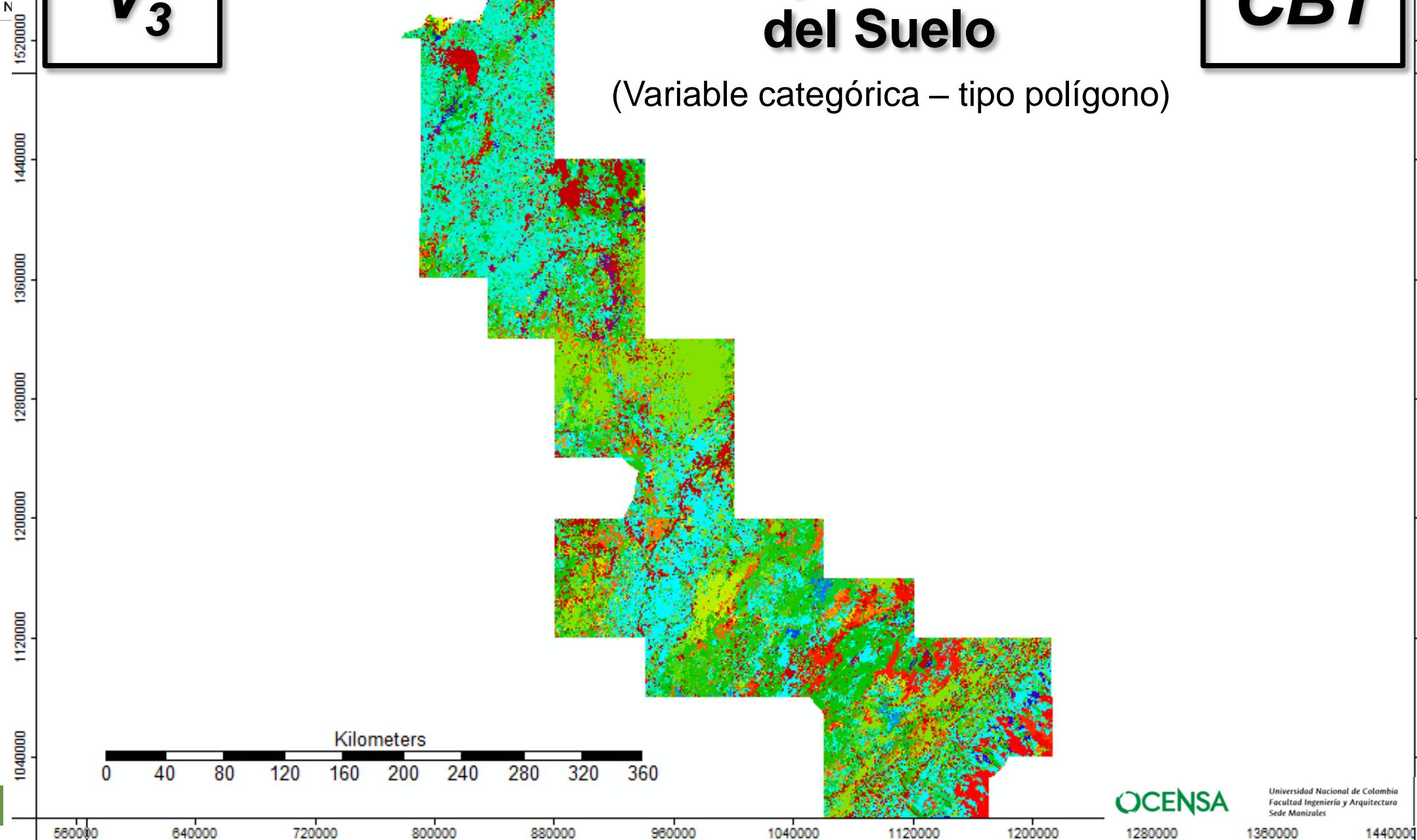
V₃



Usos y Coberturas del Suelo

(Variable categórica – tipo polígono)

CBT



0 40 80 120 160 200 240 280 320 360

Kilometers



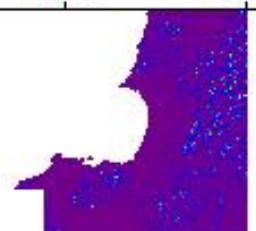
OCENSA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

23 y 24 de N

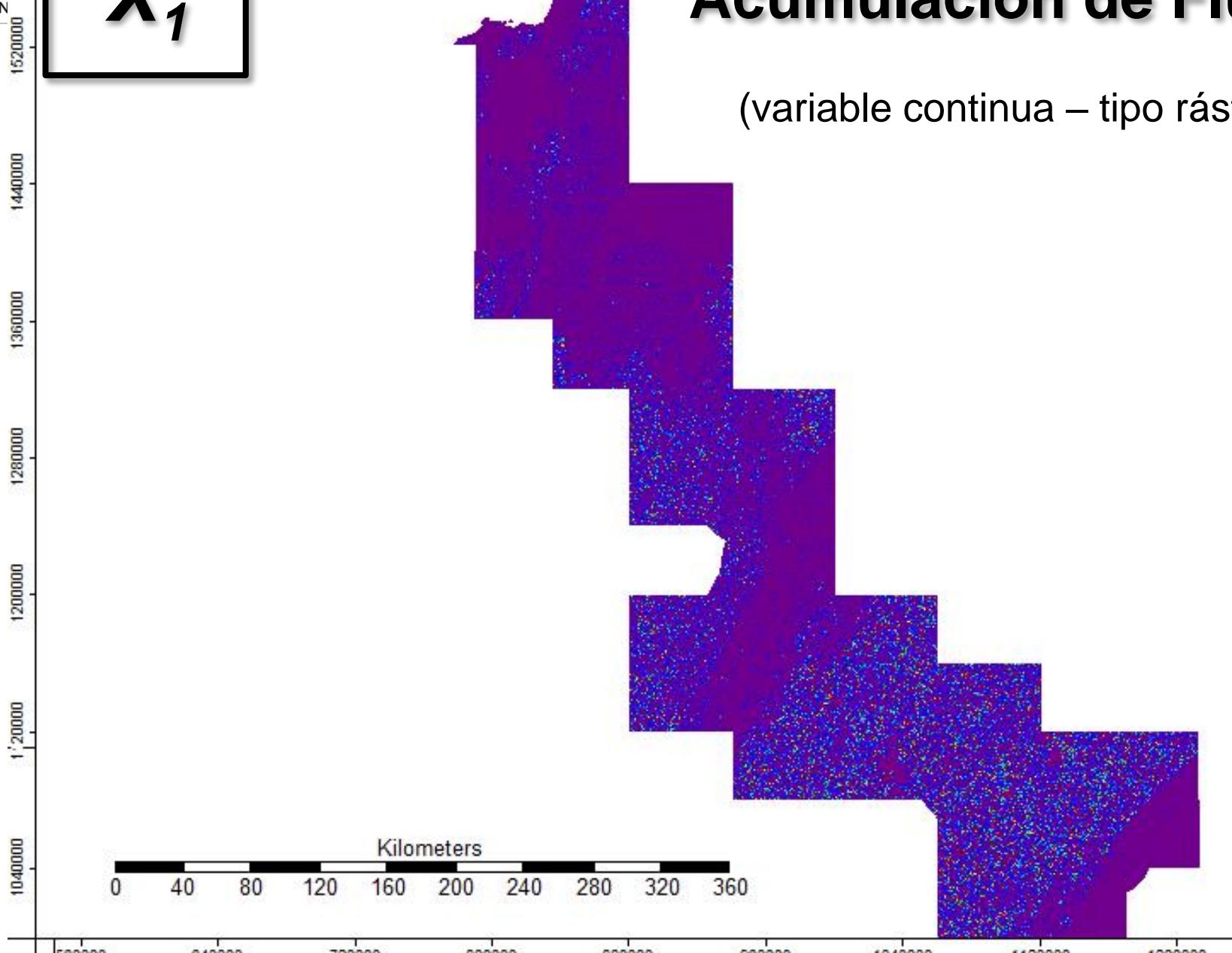
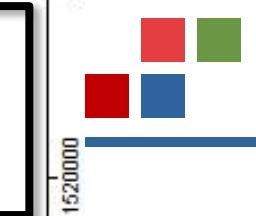
X₁



Acumulación de Flujo

(variable continua – tipo ráster)

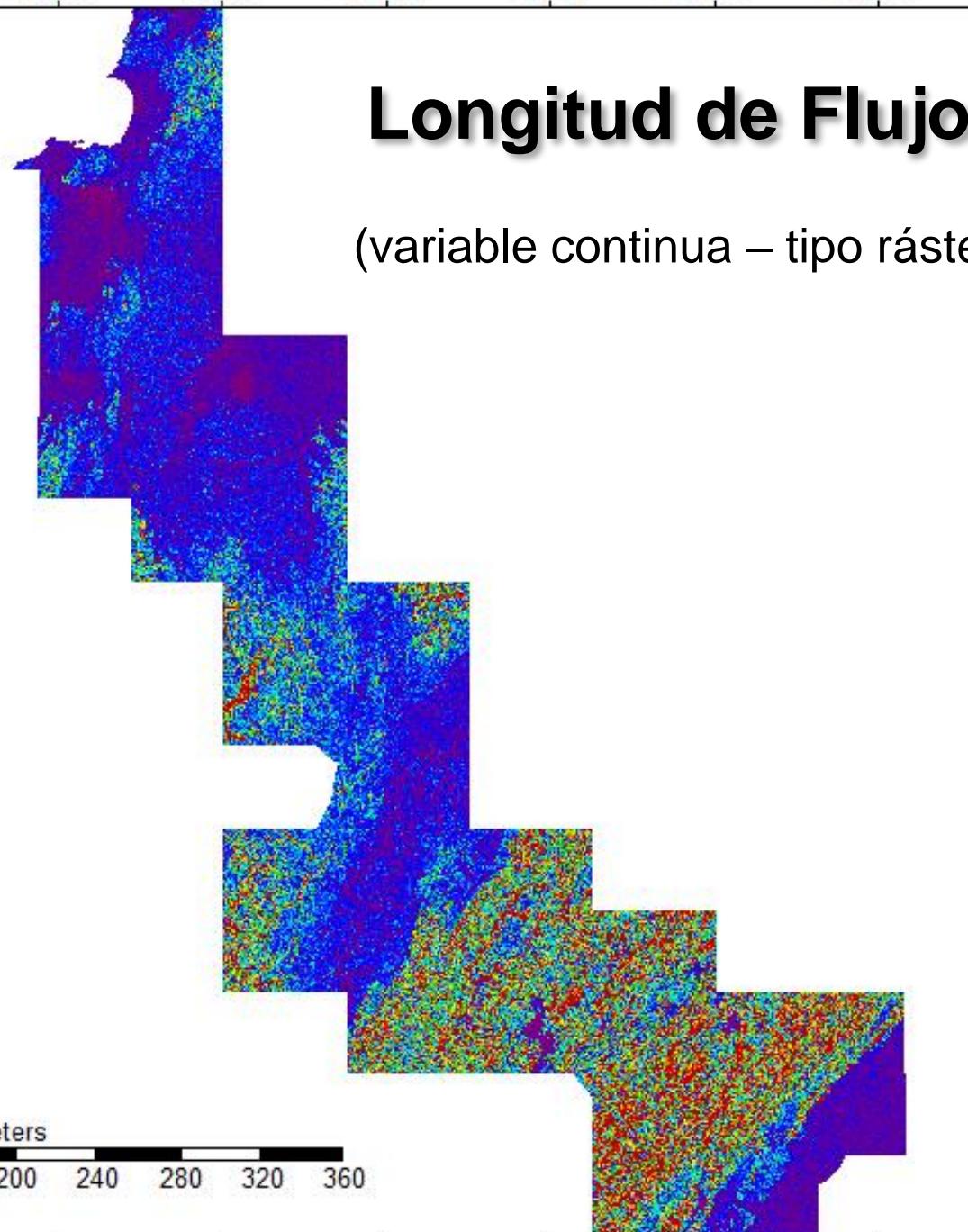
FLA



OCENSA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales

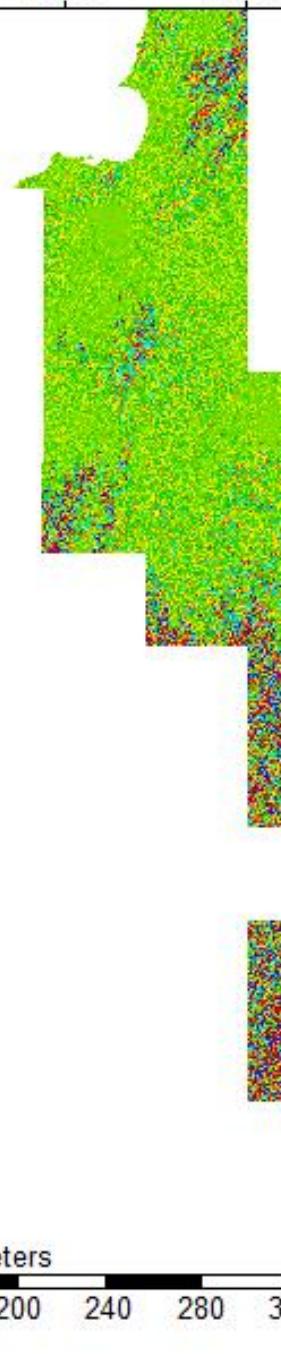
UNIVERSIDAD NACIONAL
DE COLOMBIA



OCENSA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales

UNIVERSIDAD NACIONAL
DE COLOMBIA



X₃

Curvatura General

(variable continua – tipo ráster)

GNC



Kilometers

OCENSA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales

UNIVERSIDAD NACIONAL
DE COLOMBIA

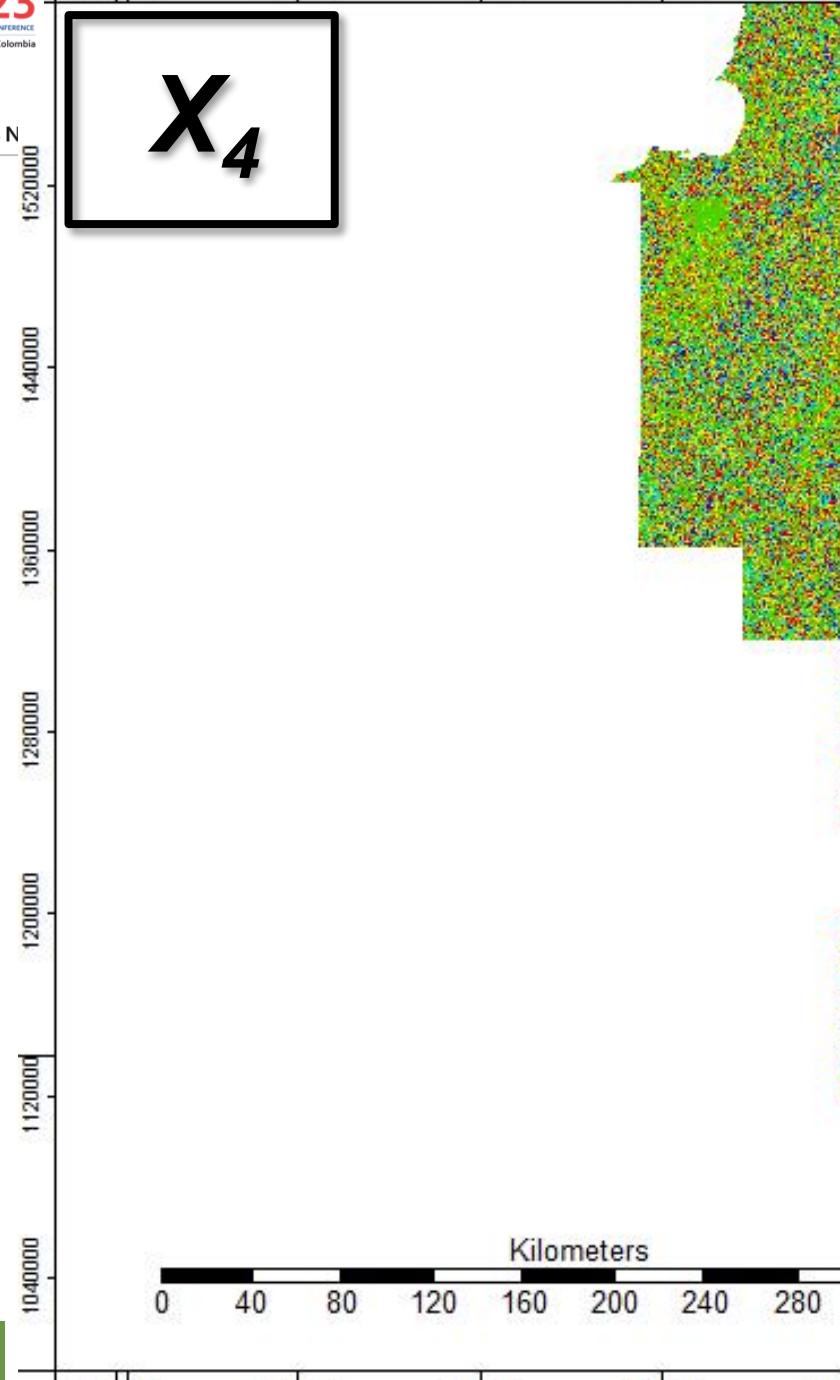
23 y 24 de N

X₄

Curvatura de Plano

PLC

(variable continua – tipo ráster)



Kilometers

OCENSA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales

UNIVERSIDAD NACIONAL
DE COLOMBIA

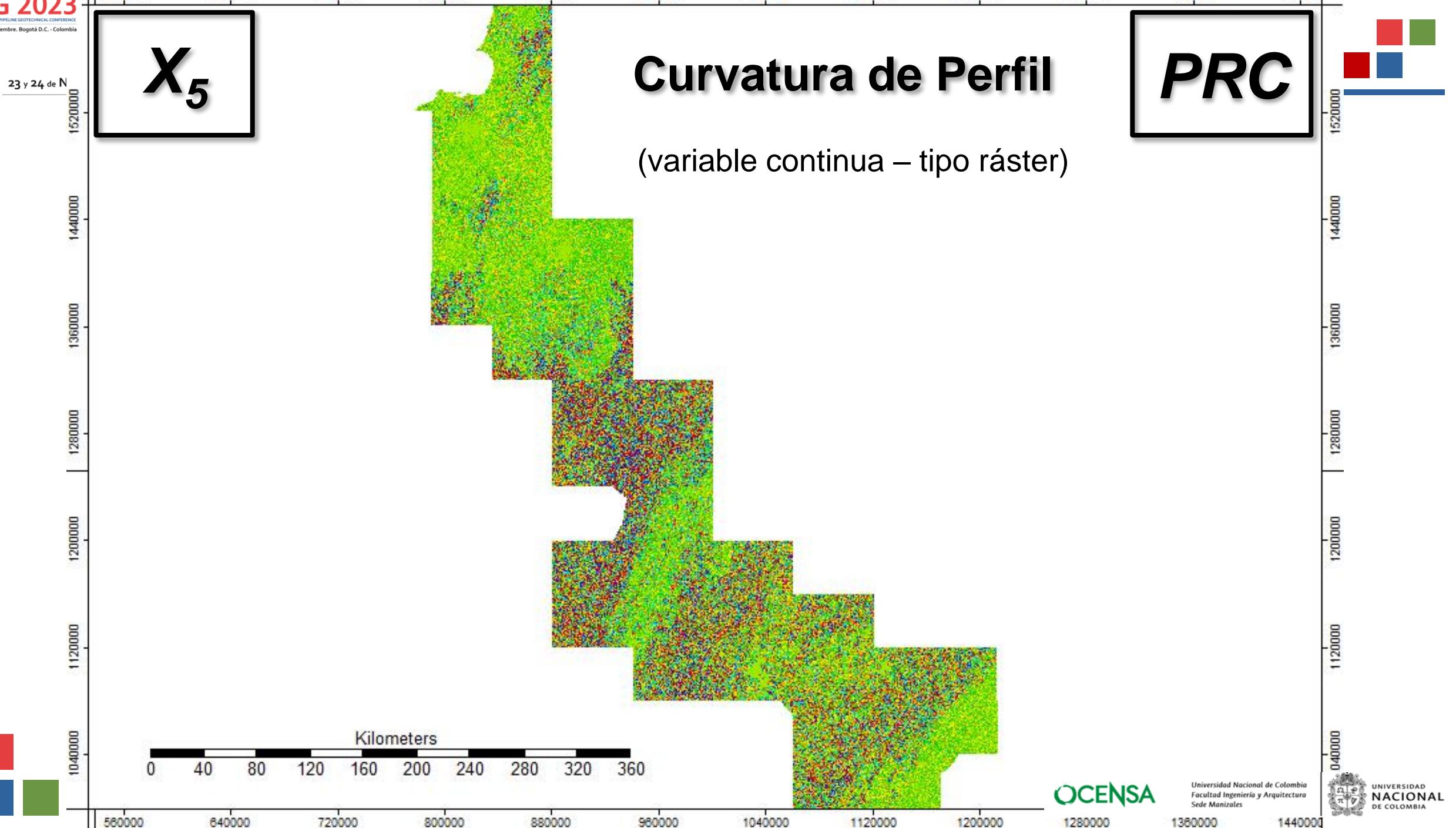
23 y 24 de N

X₅

Curvatura de Perfil

PRC

(variable continua – tipo ráster)

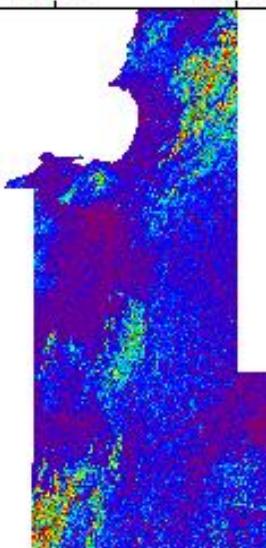


OCENSA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales

UNIVERSIDAD NACIONAL
DE COLOMBIA

X₆



Pendientes

(variable continua – tipo ráster)

SLP



23 y 24 de N

1520000

1440000

1360000

1280000

1200000

1120000

1040000

1520000

1440000

1360000

1280000

1200000

1120000

1040000

Kilometers

0 40 80 120 160 200 240 280 320 360



560000 640000 720000 800000 880000 960000 1040000 1120000 1200000

OCENSA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales

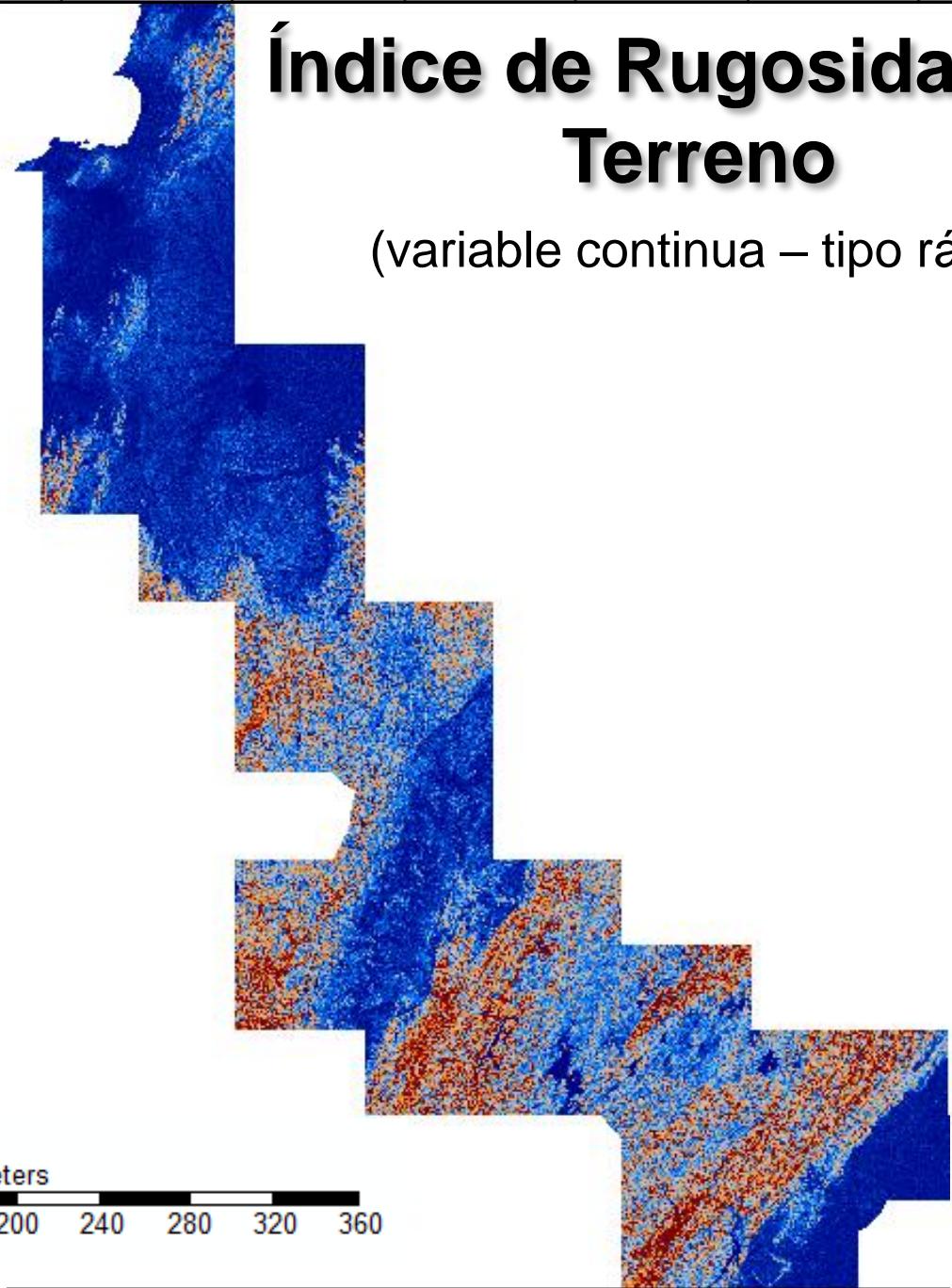
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Índice de Rugosidad del Terreno

(variable continua – tipo ráster)

X_7

TRI



0 40 80 120 160 200 240 280 320 360
Kilometers



OCENSA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

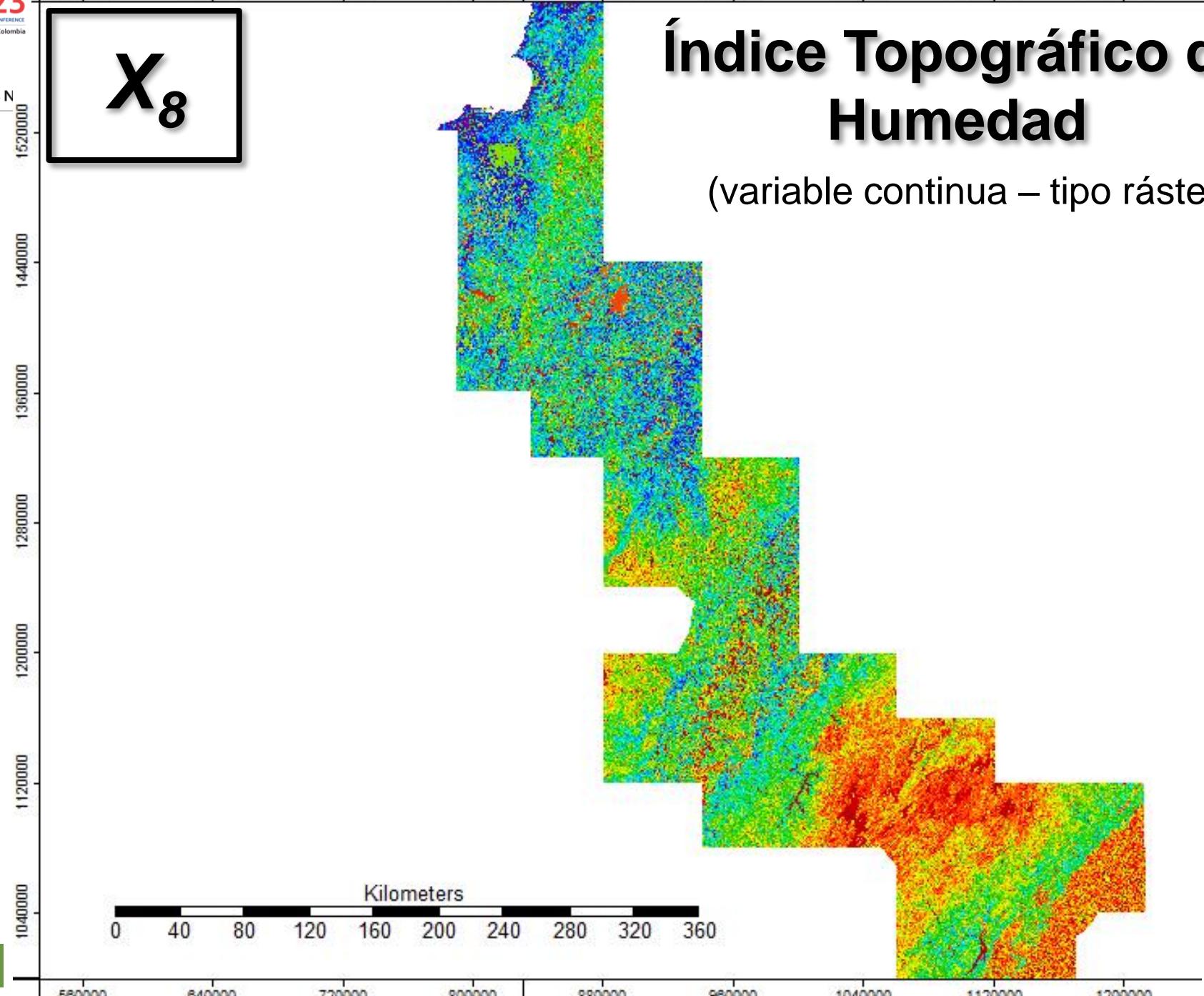
23 y 24 de N

X₈

Índice Topográfico de Humedad

TWI

(variable continua – tipo ráster)



OCENSA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

IPG 2023

INTERNATIONAL PIPELINE GEOTECHNICAL CONFERENCE

23 y 24 de Noviembre. Bogotá D.C. - Colombia



OCENSA



Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales



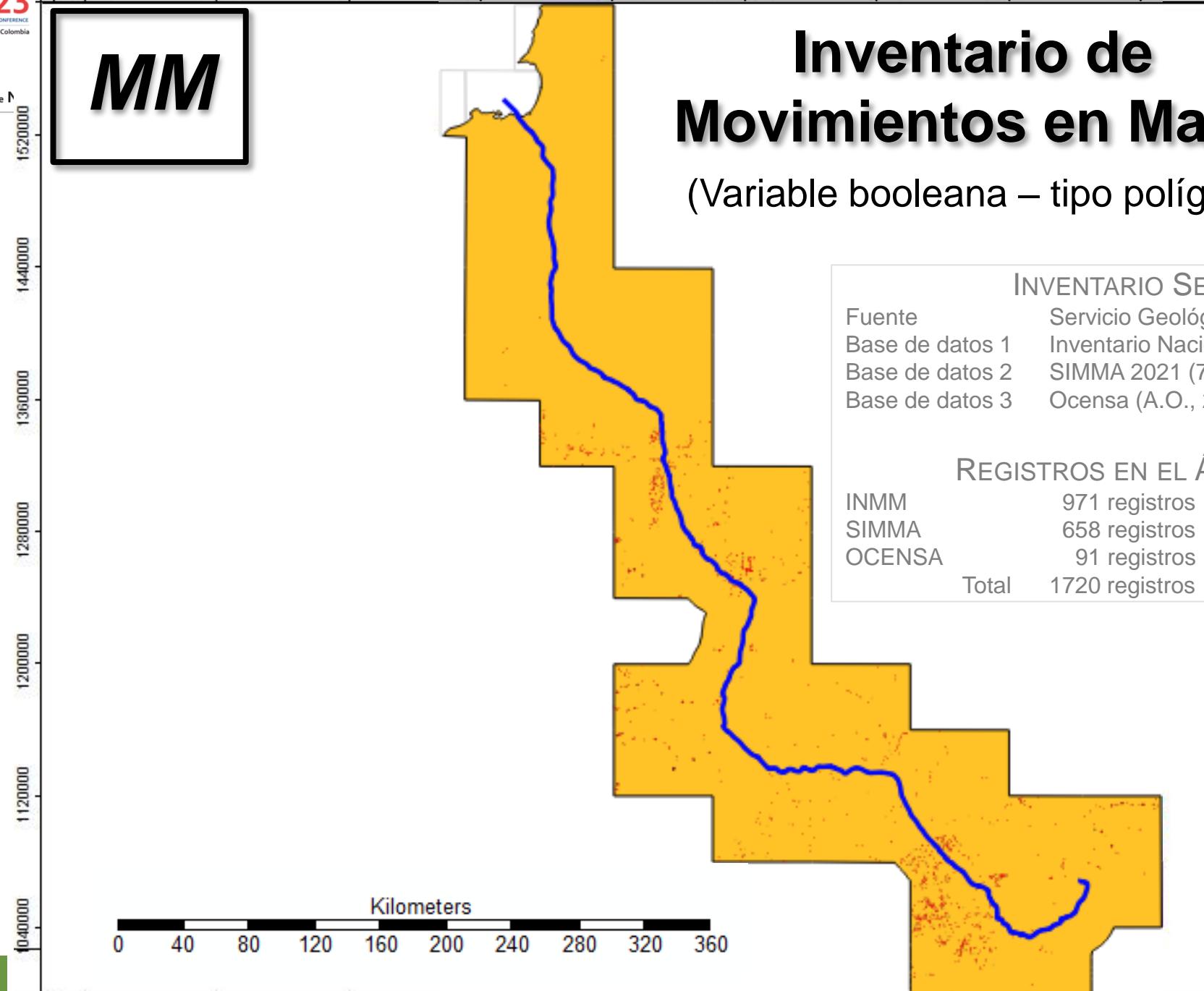
PREPROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

MM

Inventario de Movimientos en Masa

(Variable booleana – tipo polígono)

MMA

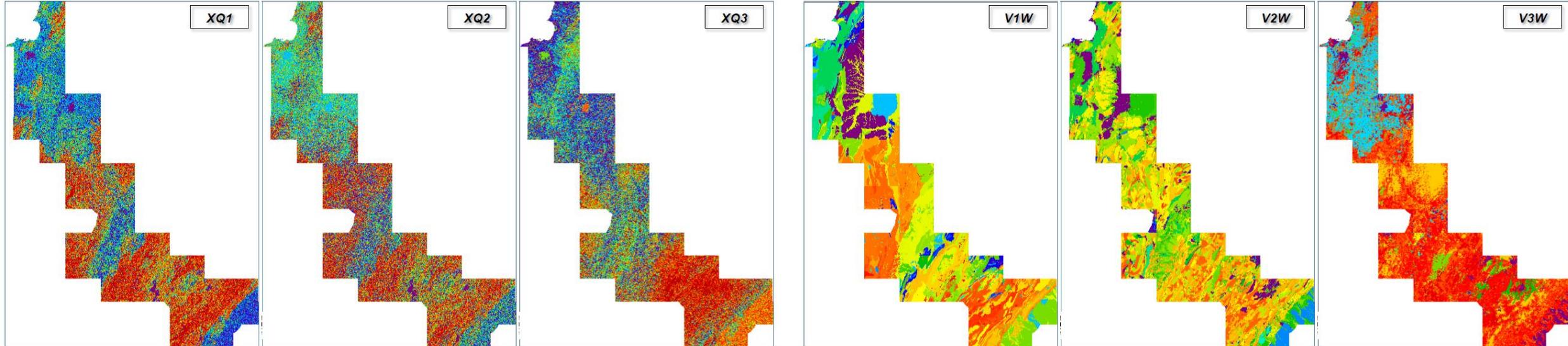
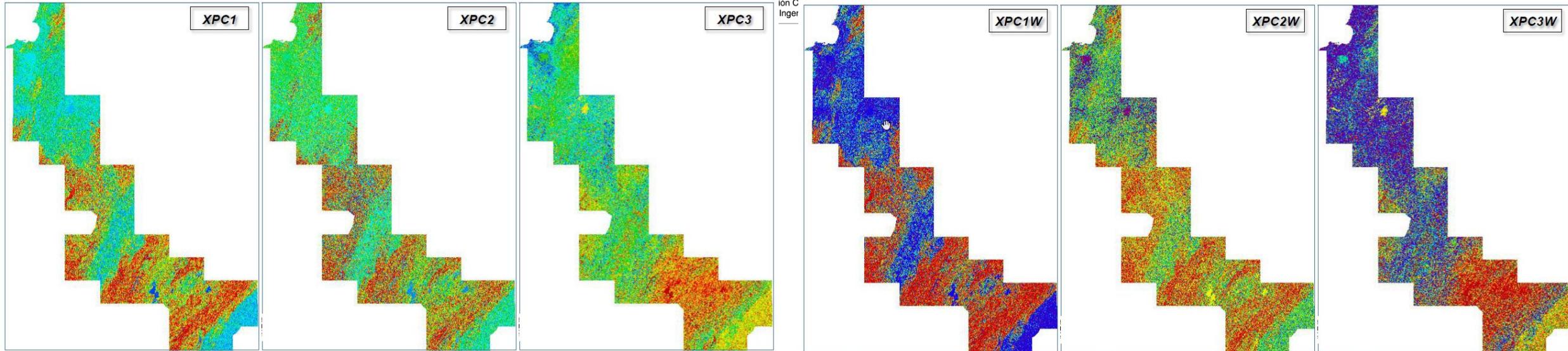


INVENTARIO SELECCIONADO

Fuente	Servicio Geológico Colombiano - SGC
Base de datos 1	Inventario Nacional de MM 2021 (6826 datos)
Base de datos 2	SIMMA 2021 (7200, la mayoría en INMM)
Base de datos 3	Ocensa (A.O., 2021)

REGISTROS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

INMM	971 registros
SIMMA	658 registros
OCENSA	91 registros
Total	1720 registros



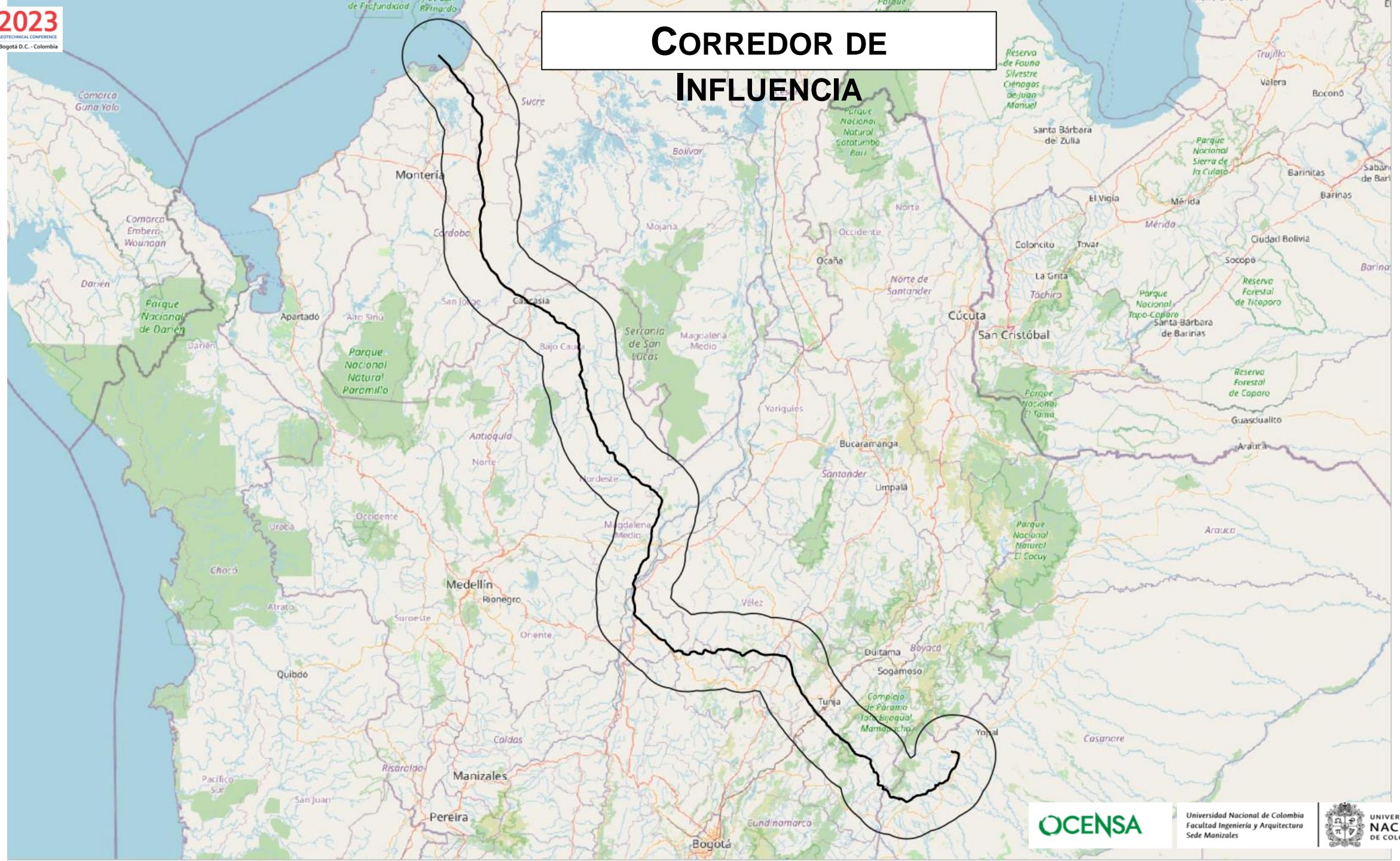
CONTEXTO GEOGRÁFICO GENERAL



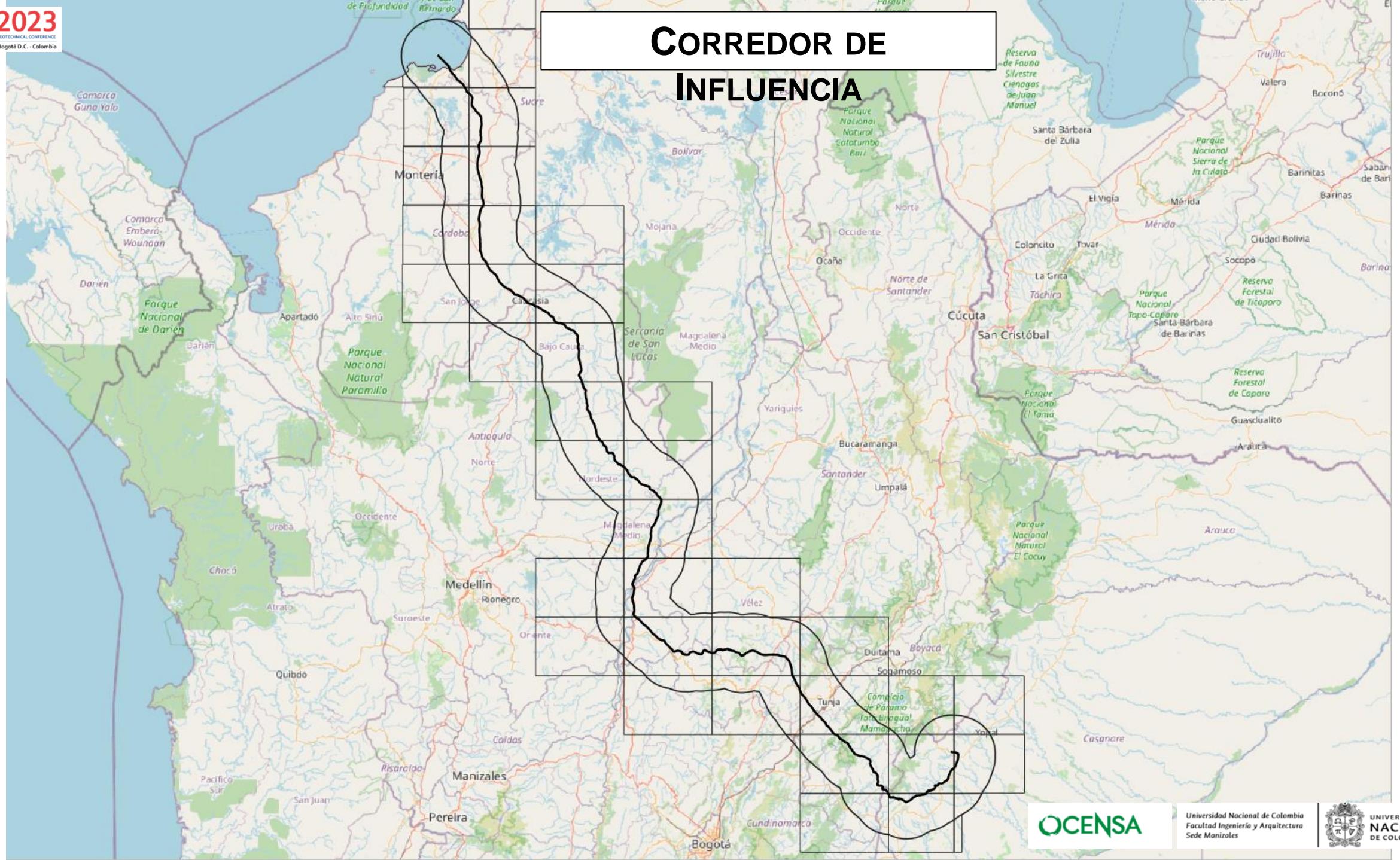
LOCALIZACIÓN OLEODUCTO



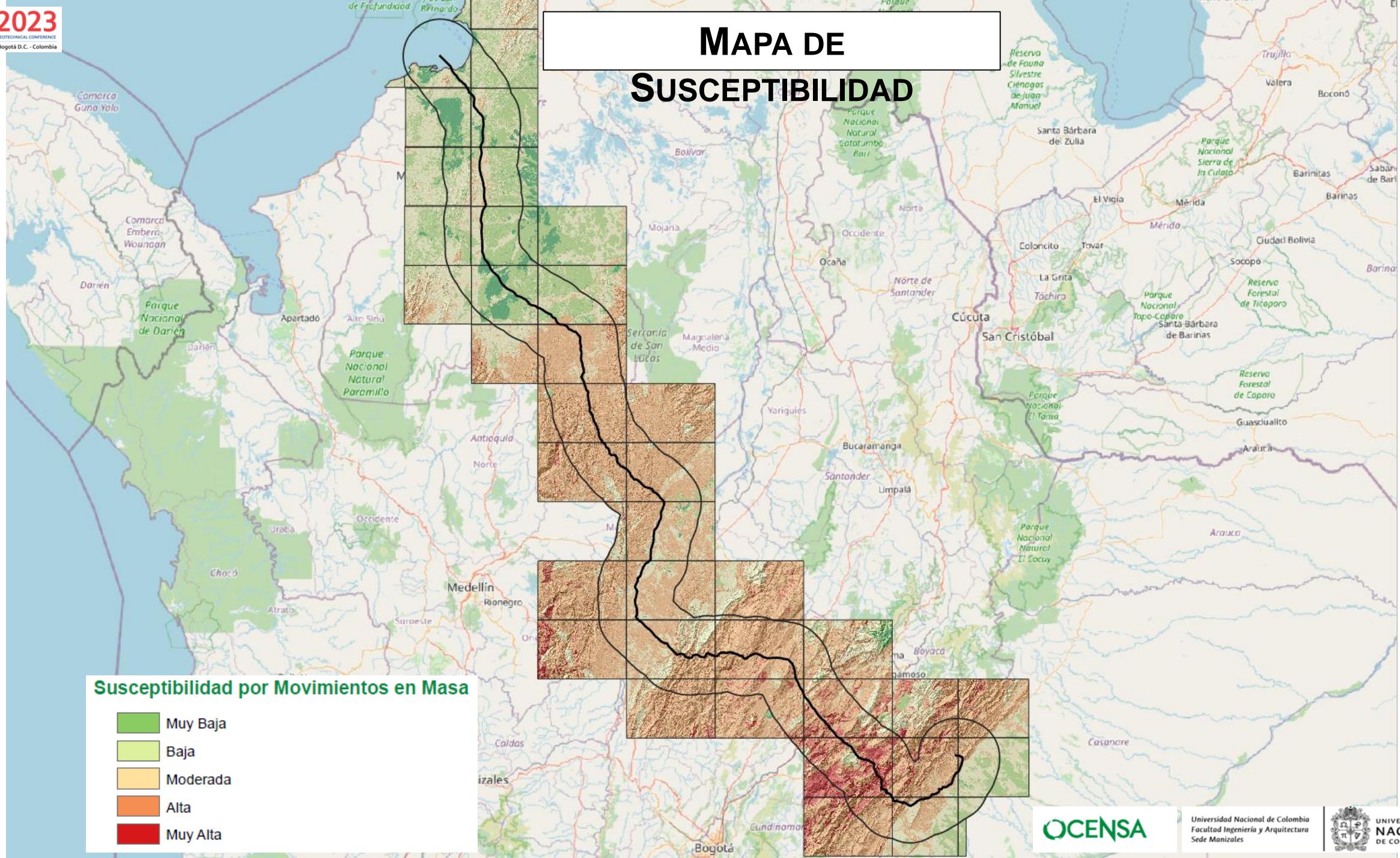
CORREDOR DE INFLUENCIA



CORREDOR DE INFLUENCIA



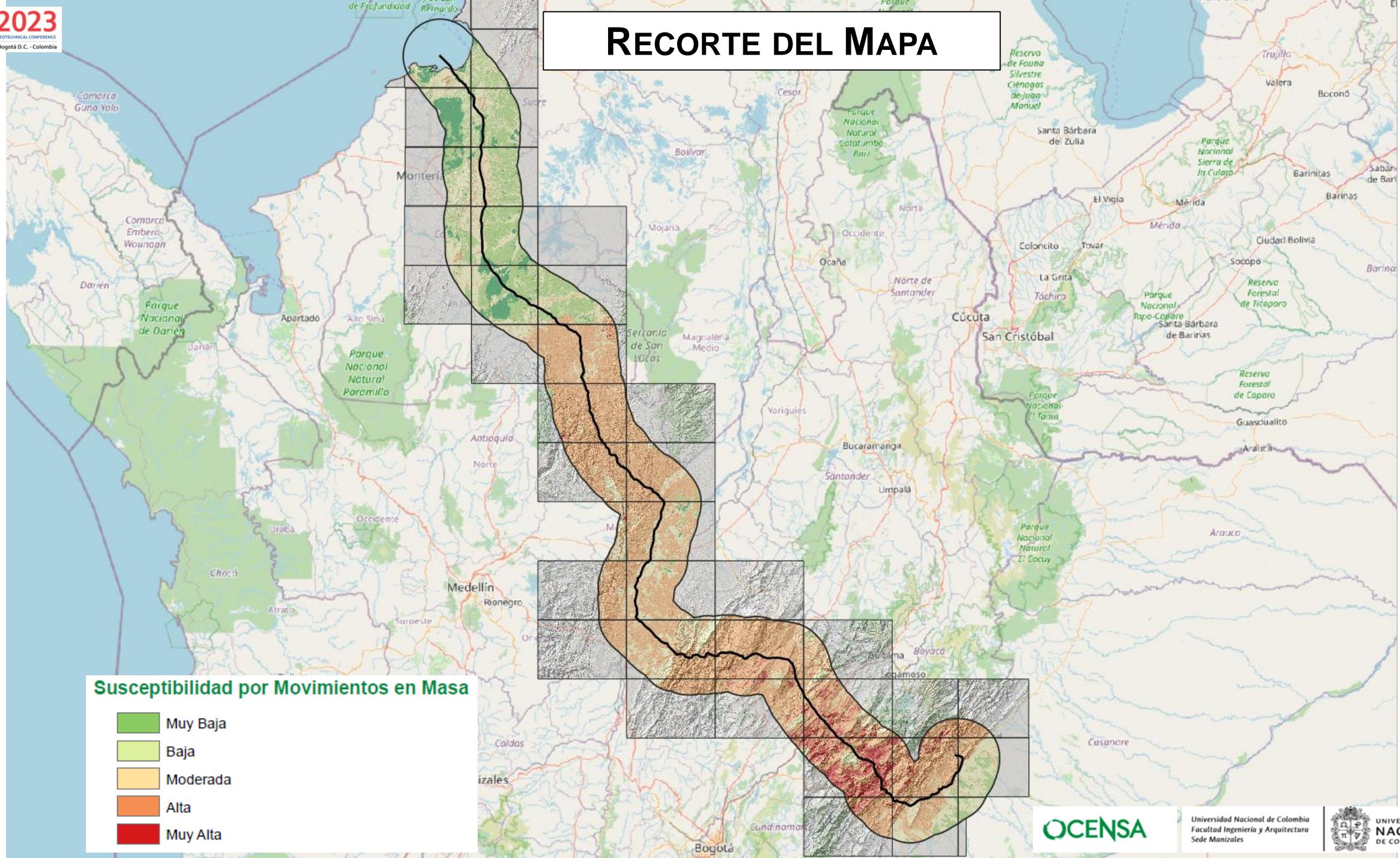
MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD



RECORTE DEL MAPA

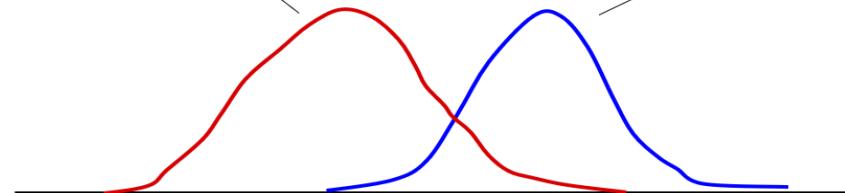
Susceptibilidad por Movimientos en Masa

-





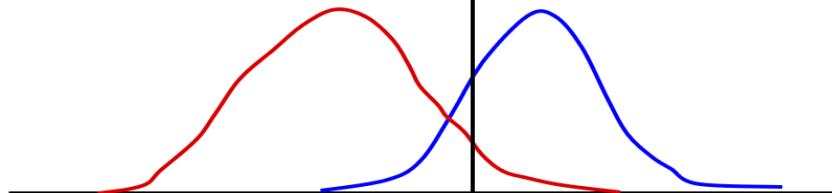
Prueba modelo Evento real	Pronóstico de NO deslizamiento	Pronóstico de deslizamiento
No deslizamiento ($q = 1 - p = 0.0$)	ESPECIFICIDAD: Verdaderos negativos $1 - \alpha$	ERROR TIPO I: Falsos positivos α
Deslizamiento ($p = 1.0$)	ERROR TIPO II: Falsos negativos β	SENSITIVIDAD: Verdaderos positivos $1 - \beta$

puntos sin
deslizamientopuntos con
deslizamiento

prueba del modelo

eventos negativos

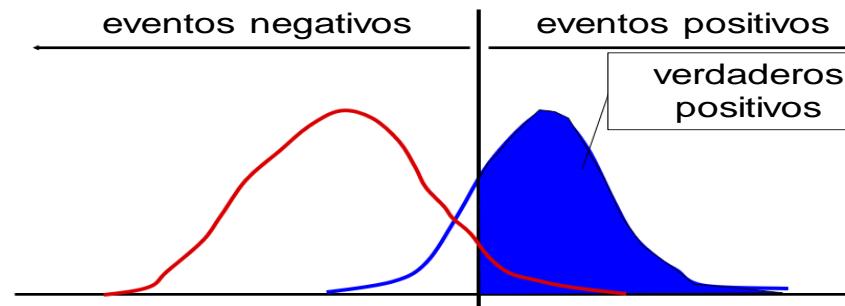
eventos positivos



prueba del modelo

eventos negativos

eventos positivos

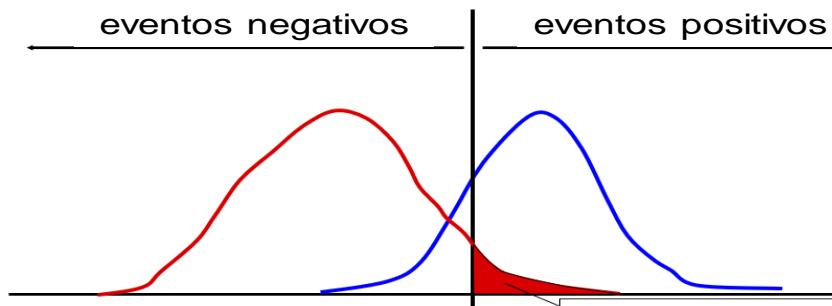
verdaderos
positivos

prueba del modelo

eventos negativos

eventos positivos

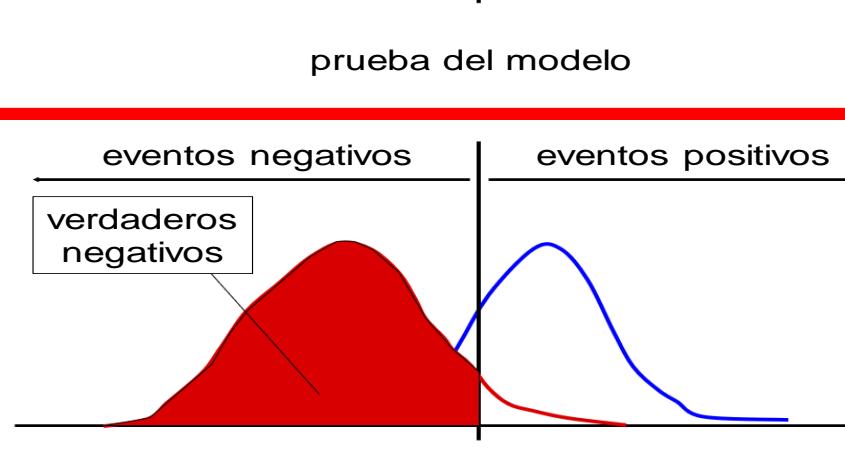
falsos positivos



prueba del modelo

eventos negativos

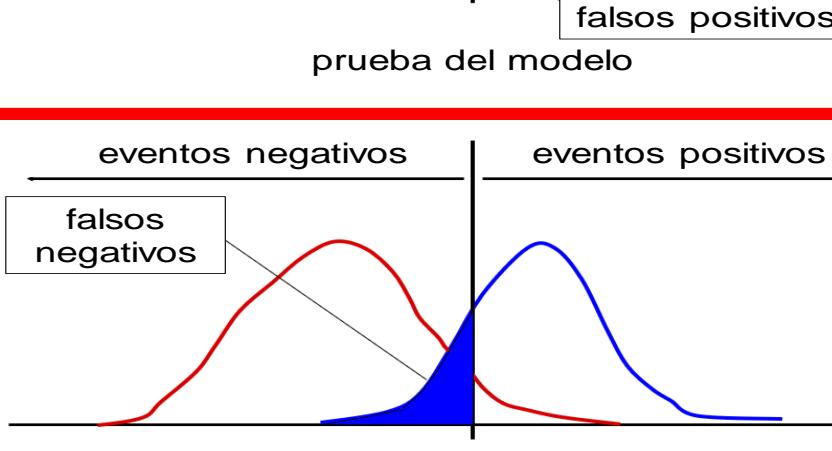
eventos positivos

verdaderos
negativos

prueba del modelo

eventos negativos

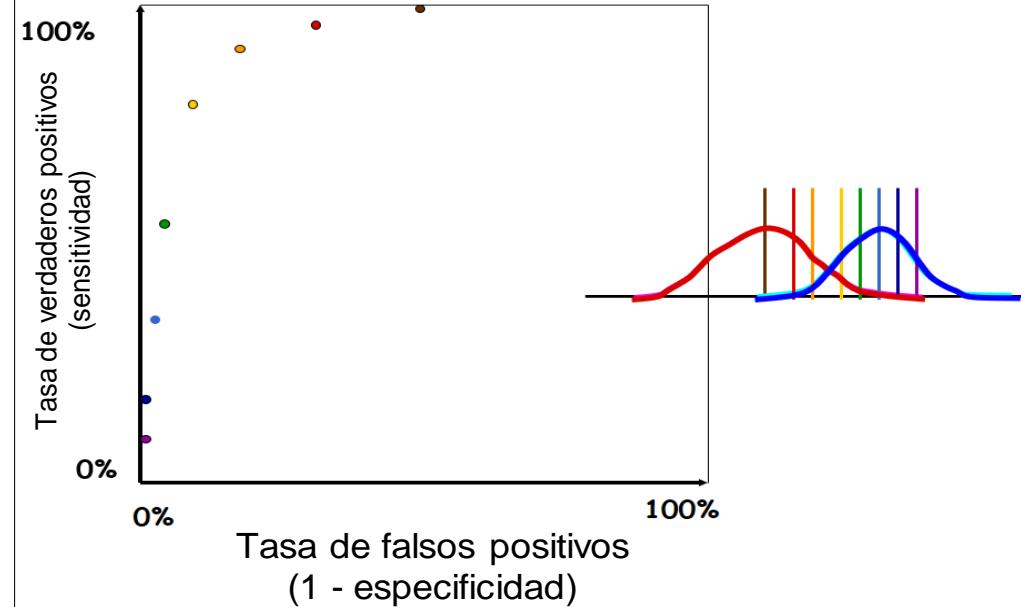
eventos positivos

falsos
negativos

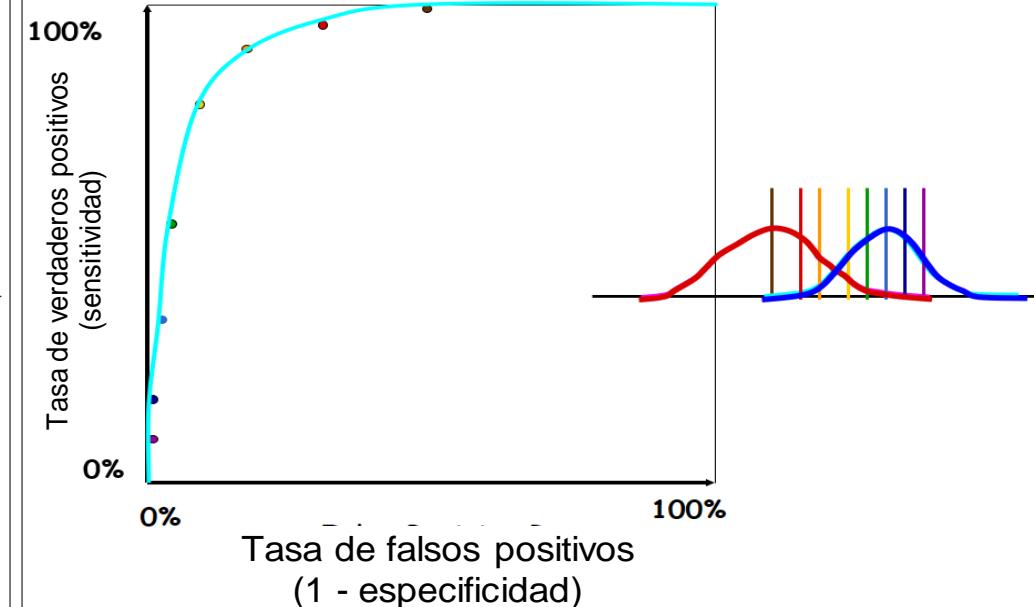
prueba del modelo



Curvas ROC

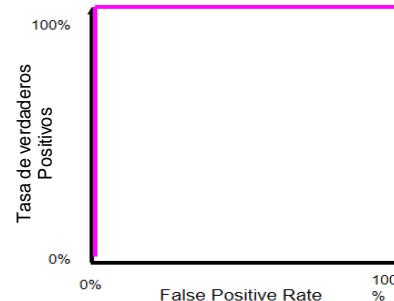


Curvas ROC

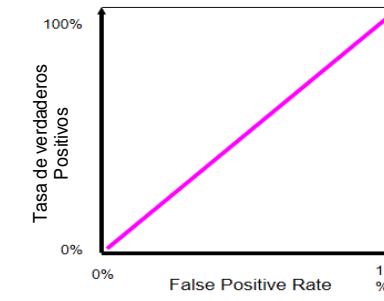


Curvas ROC Extremas

modelo perfecto



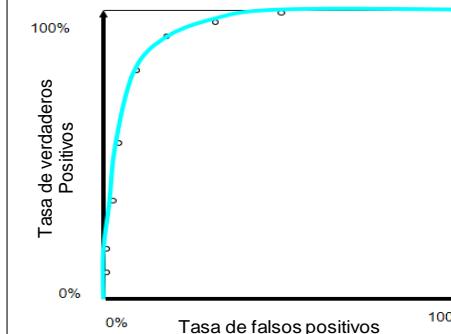
modelo inútil



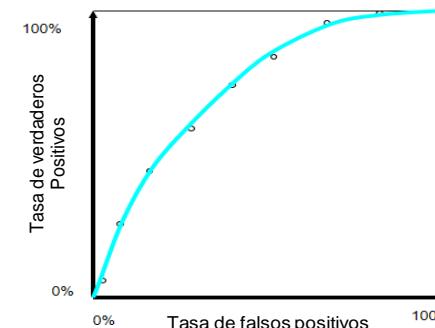
Distribuciones sin ningún traslape

Comparación de Curvas ROC

mejor modelo

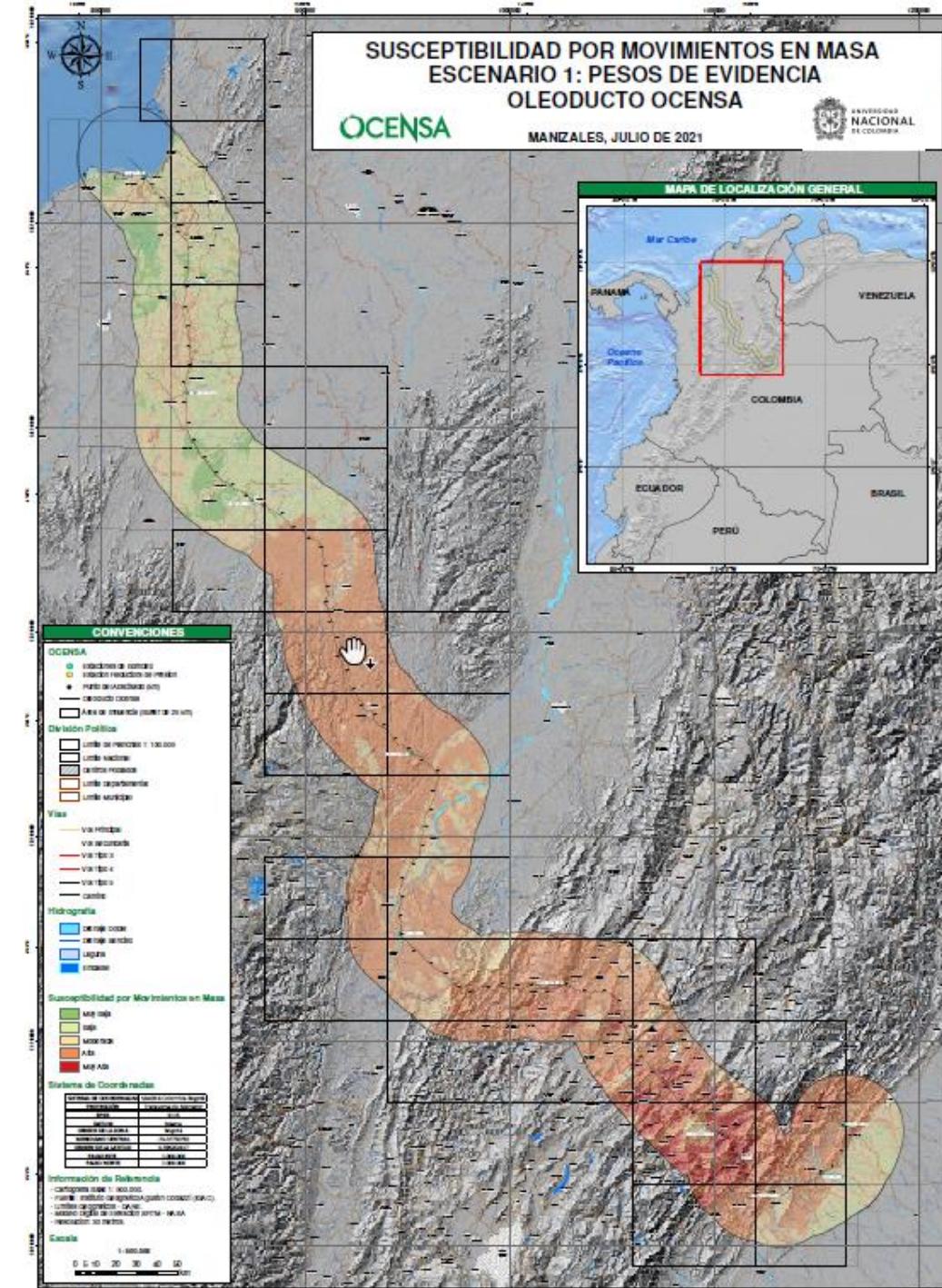
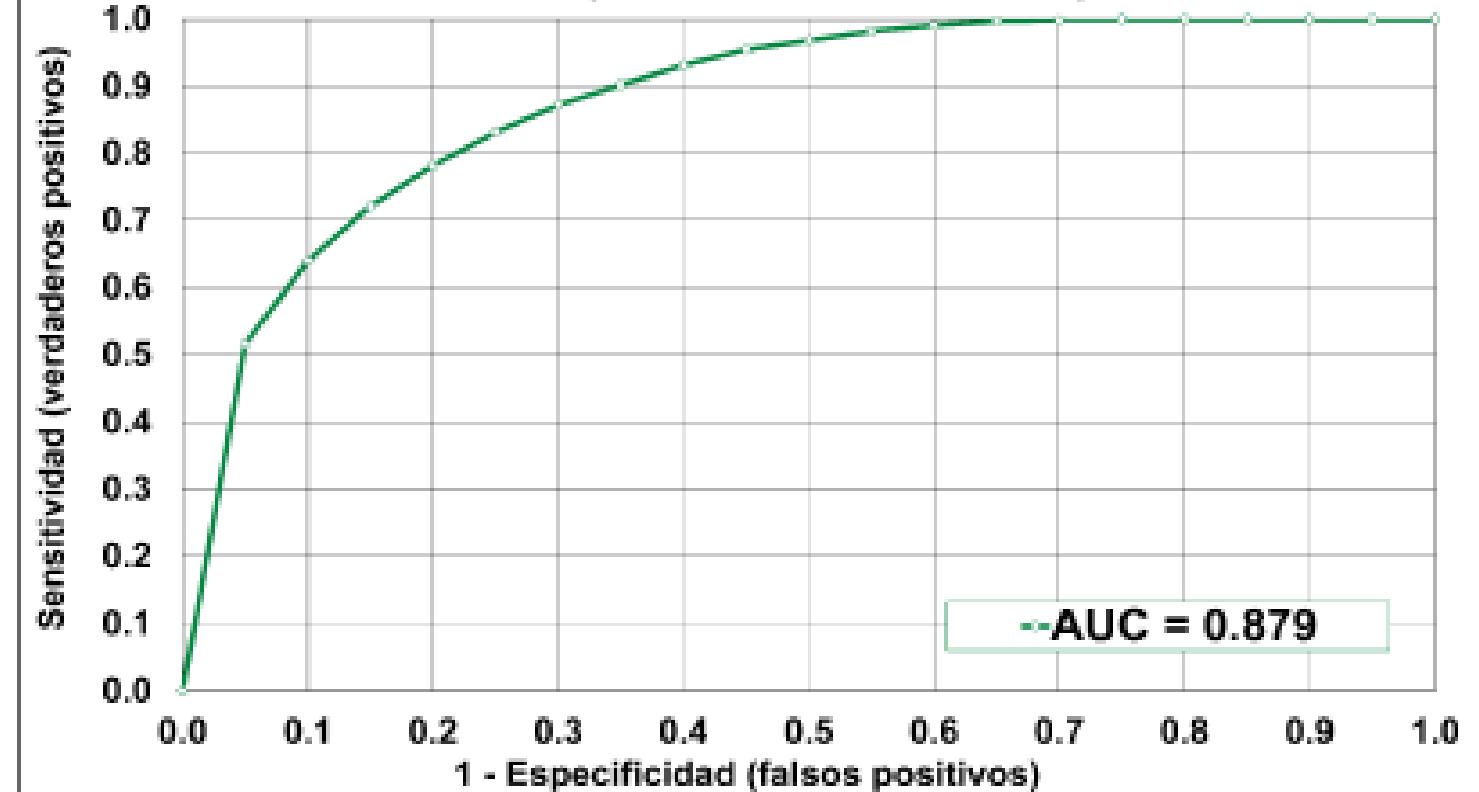


peor modelo



Curva ROC

Curva ROC (Pesos de Evidencia)



Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa (SGC, 2019)

Base cartográfica: IGAC, 1:100,000

Escala de trabajo: **1:100,000**

Modelo de Elevación Digital: SRTM NASA – píxel de **30 metros**

de movimientos en masa: **1104**

Ventana de observación: **1909 – 2020**

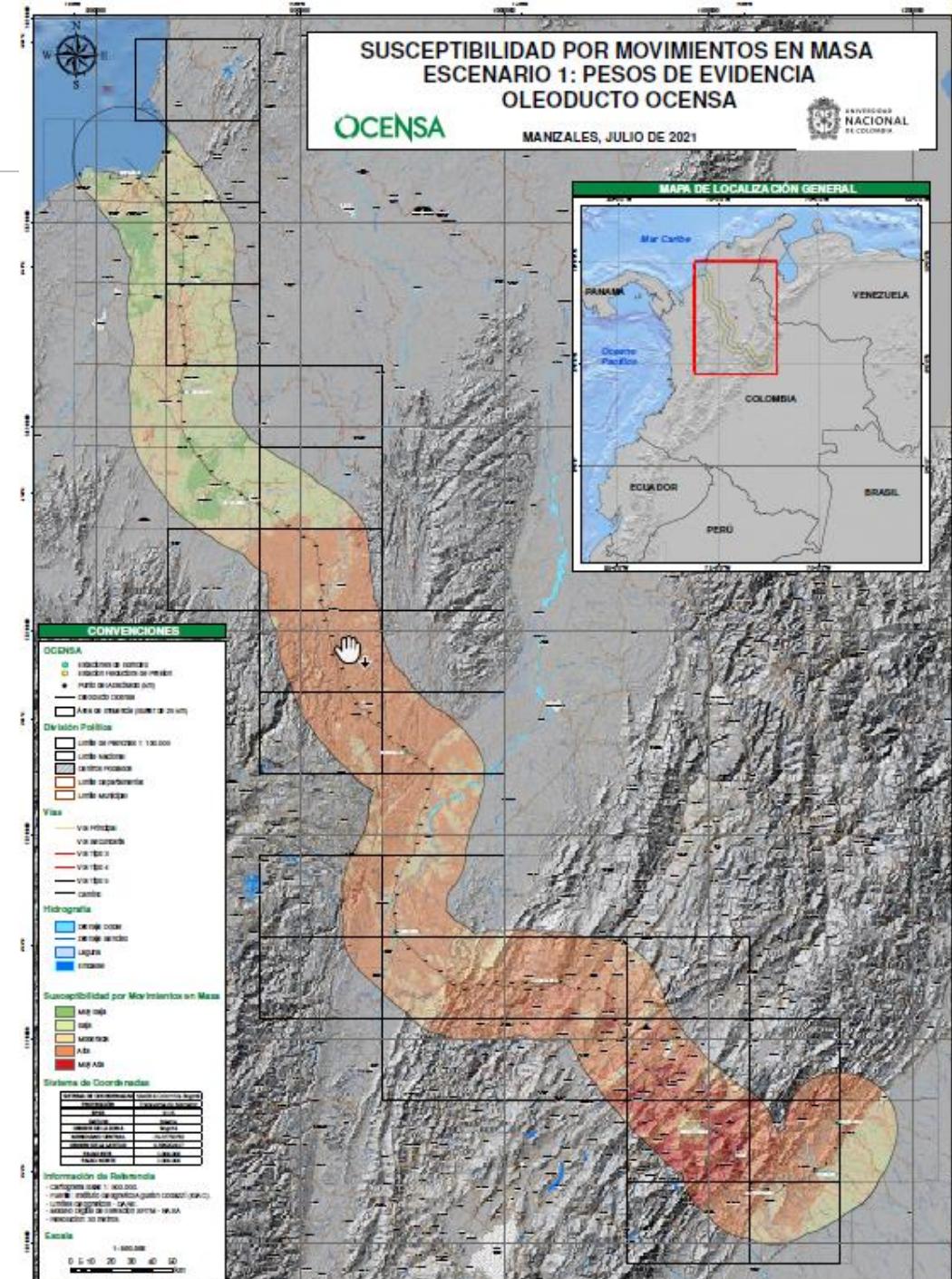
Método de análisis: **Pesos de Evidencia** (estadístico bivariado)

Método de validación: **Curva de éxito (área bajo la curva)**

Rendimiento: **87.9%**

Variables:

Unidades Geológicas Superficiales, **Unidades Geomorfológicas**, Coberturas de la Tierra y Uso del Suelo, **Pendientes**, Curvatura de Plano, **Curvatura de Perfil**, Curvatura General, **Longitud de Flujo**, Acumulación de Flujo, Índice Topográfico de **Humedad**, Índice de Rugosidad del Terreno, **Inventario de Movimientos en Masa**

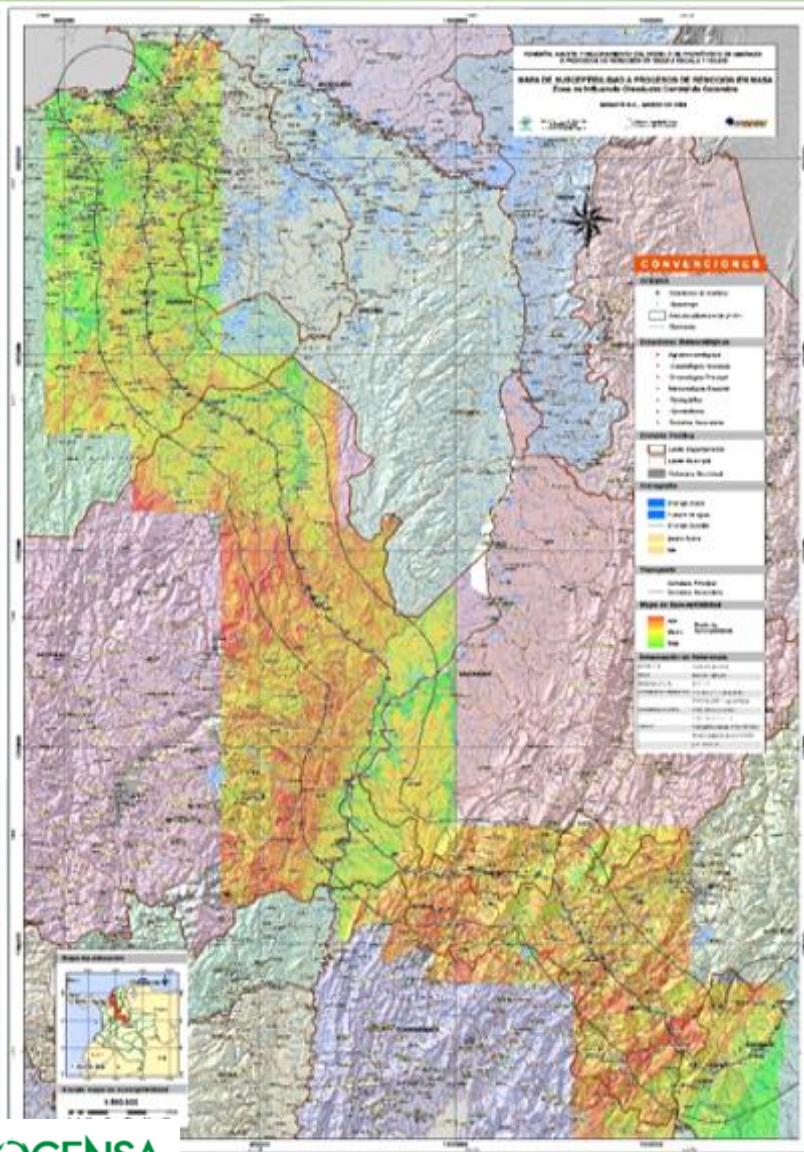




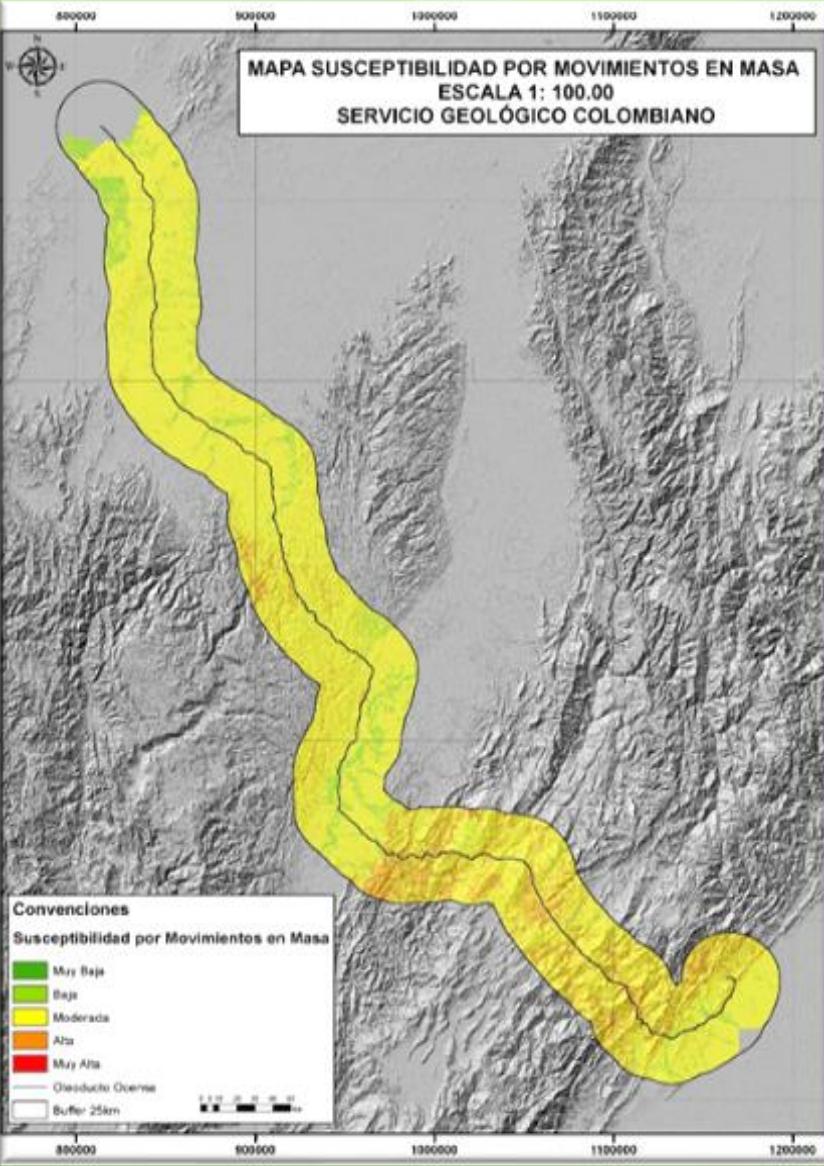
Clase de Susceptibilidad	Área de Análisis			Área de Estudio (buffer de 25 km)		
	# de Píxeles	(km ²)	(%)	# de Píxeles	(km ²)	(%)
Muy Baja	2,597,487	2,338	3.0	1,576,067	1,418	3.7
Baja	12,760,950	11,485	14.6	6,168,583	5,552	14.4
Media	22,327,782	20,095	25.6	9,516,696	8,565	22.2
Alta	45,455,961	40,910	52.1	23,470,659	21,124	54.7
Muy Alta	4,126,019	3,713	4.7	2,150,728	1,936	5.0
Total	87,268,199	78,541	100	42,882,733	38,594	100
Número Total de Píxeles en la Extensión del Mapa						
	290,705,464			250,239,990		
Número de Total de Píxeles sin Datos						
	203,437,265			207,357,257		
Número de Total de Píxeles con Datos						
	87,268,199			42,882,733		

COMPARACIÓN DE MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

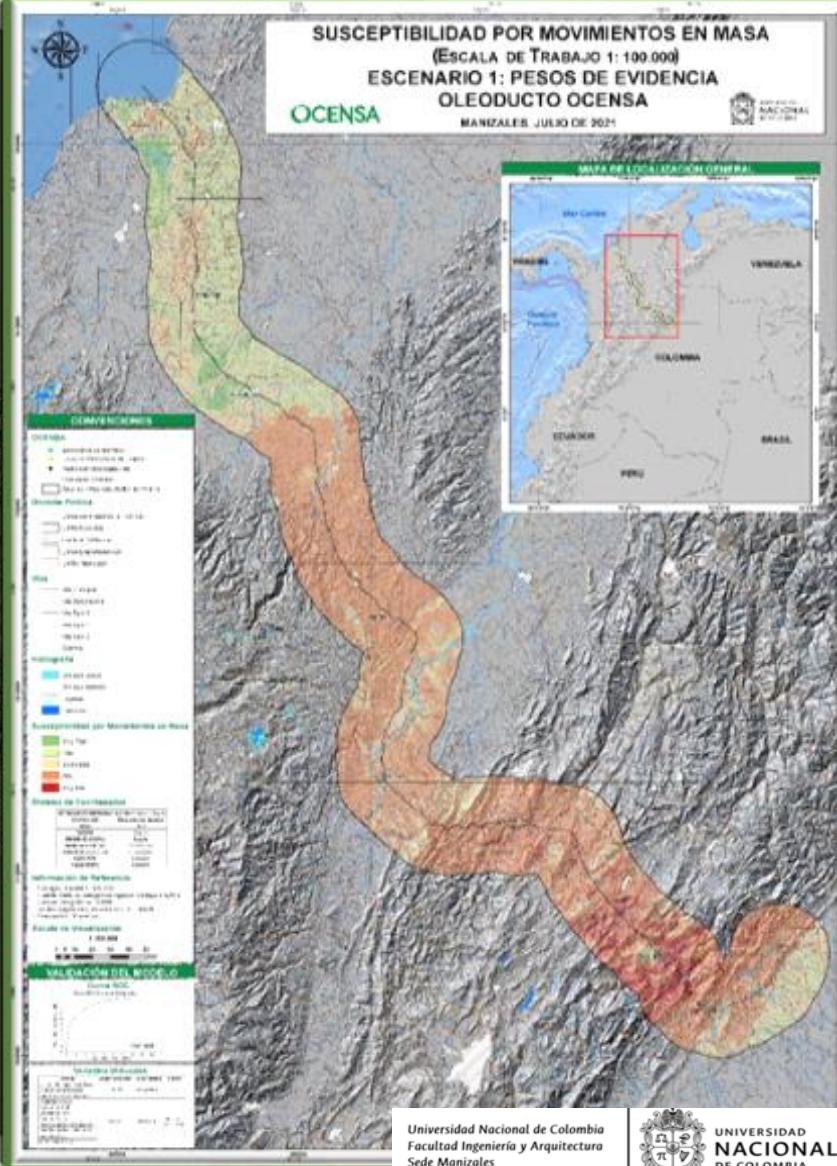
IDEAM – DATUM, 2009



SGC 2017



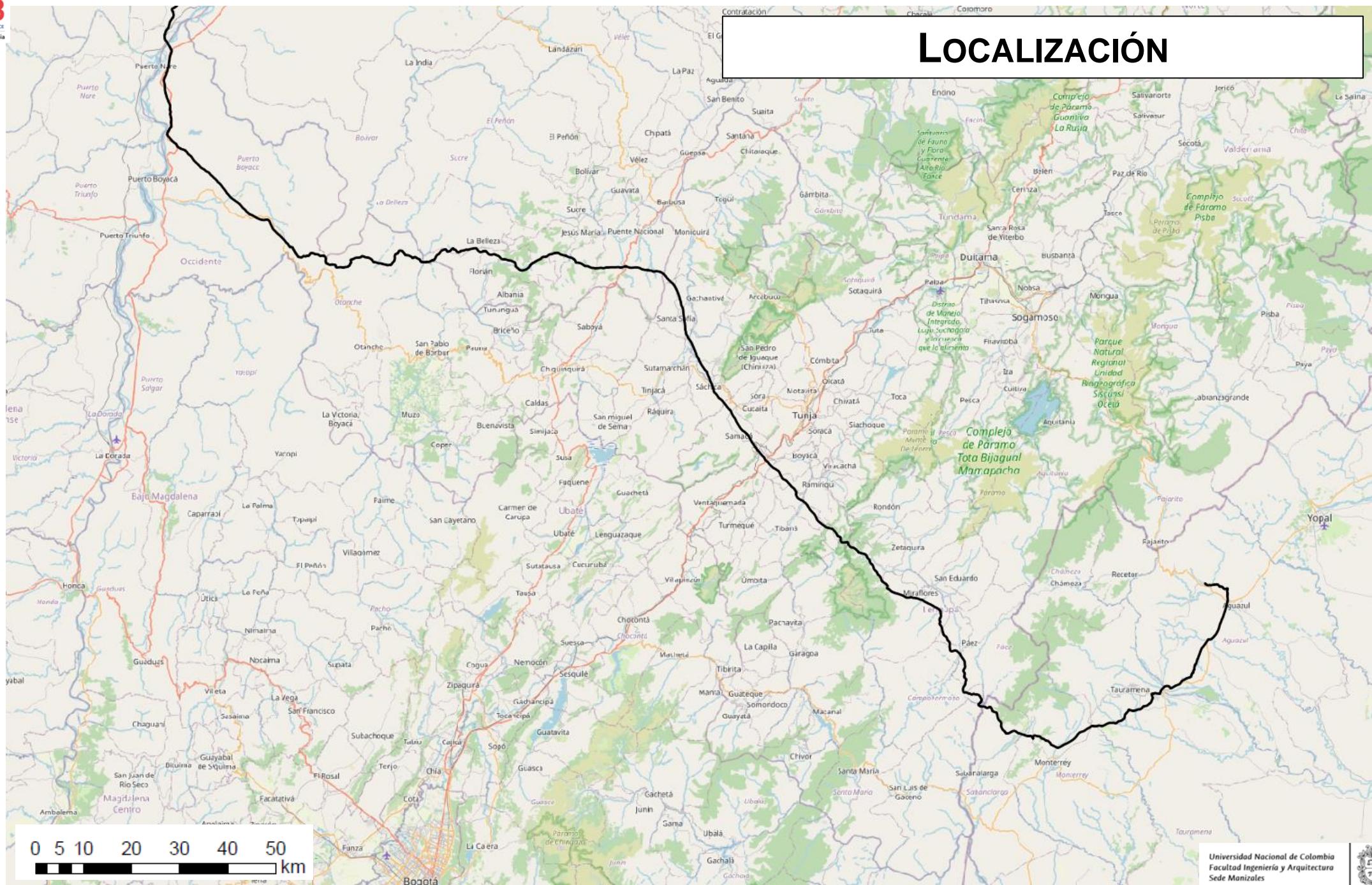
UNAL FIA 2021 WoE

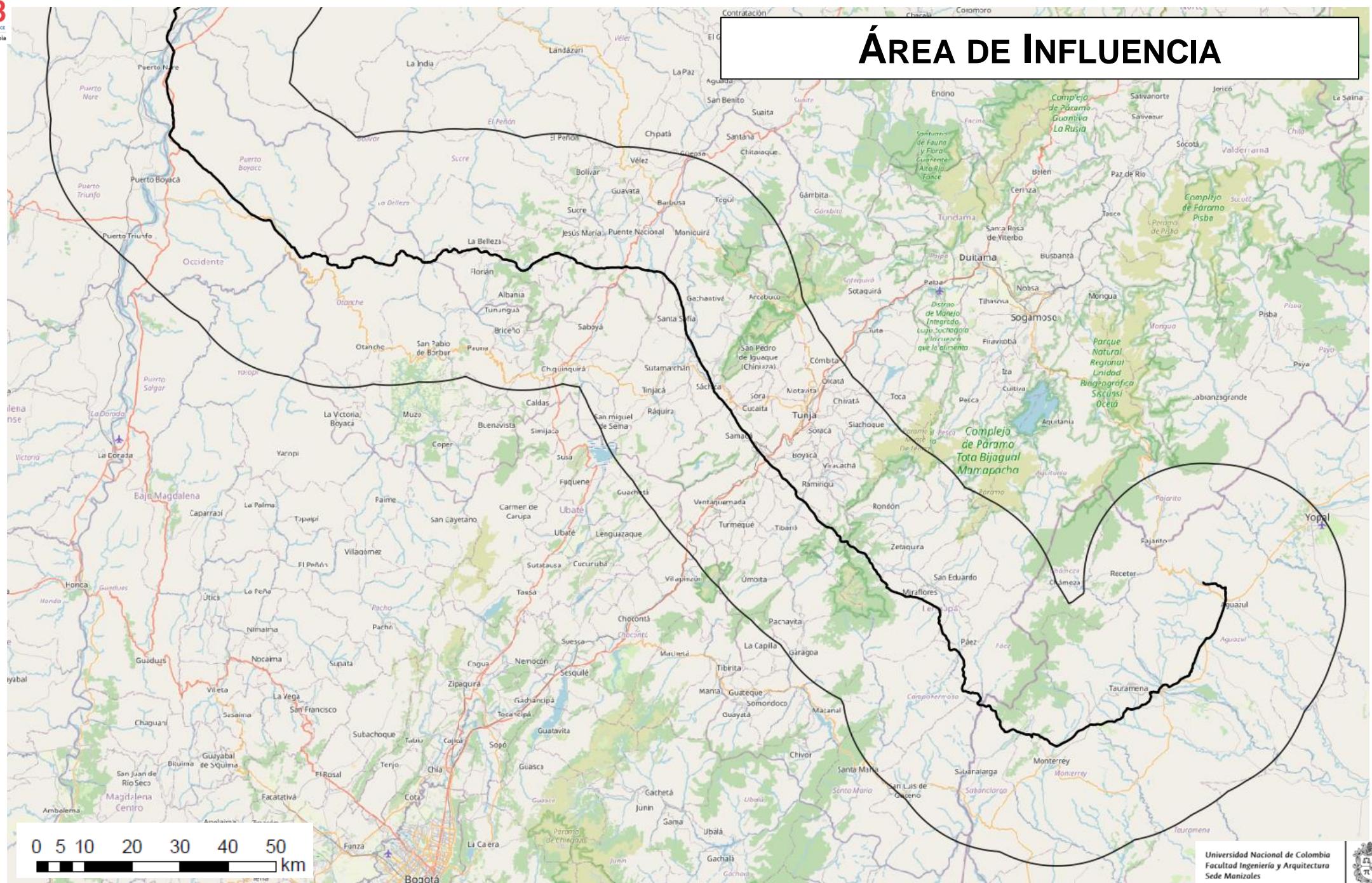


CONTEXTO GEOGRÁFICO REGIONAL

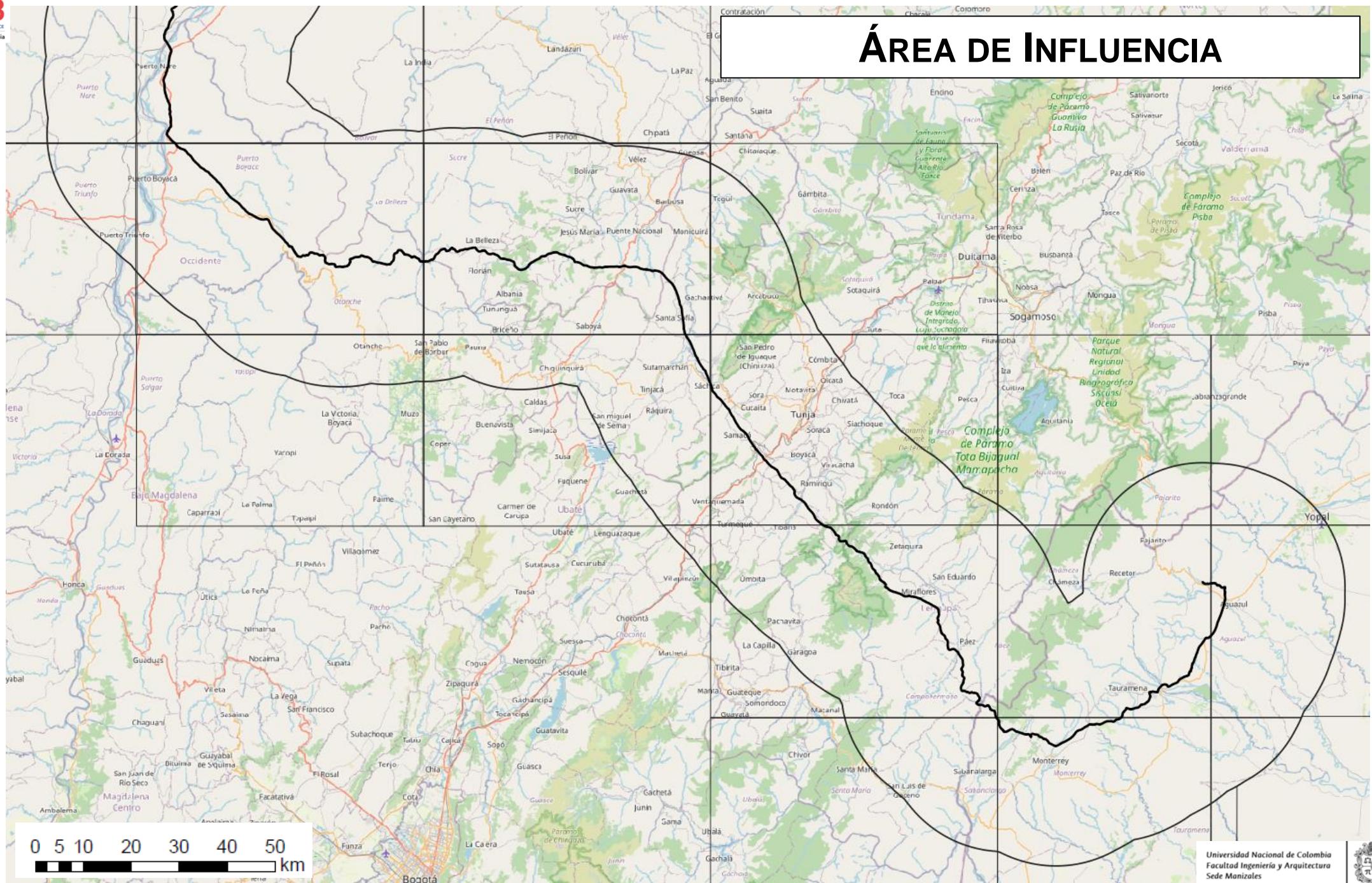


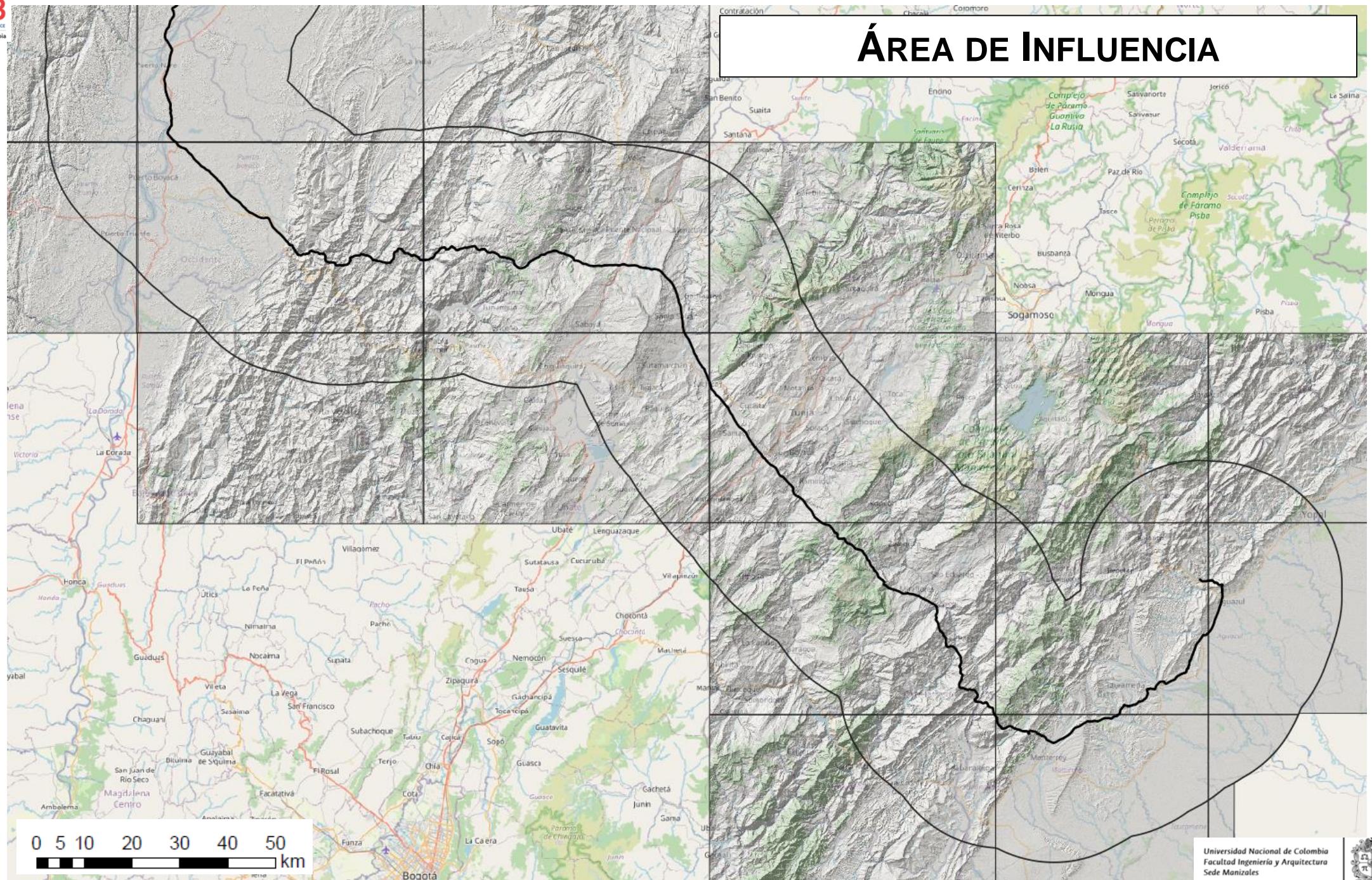
LOCALIZACIÓN

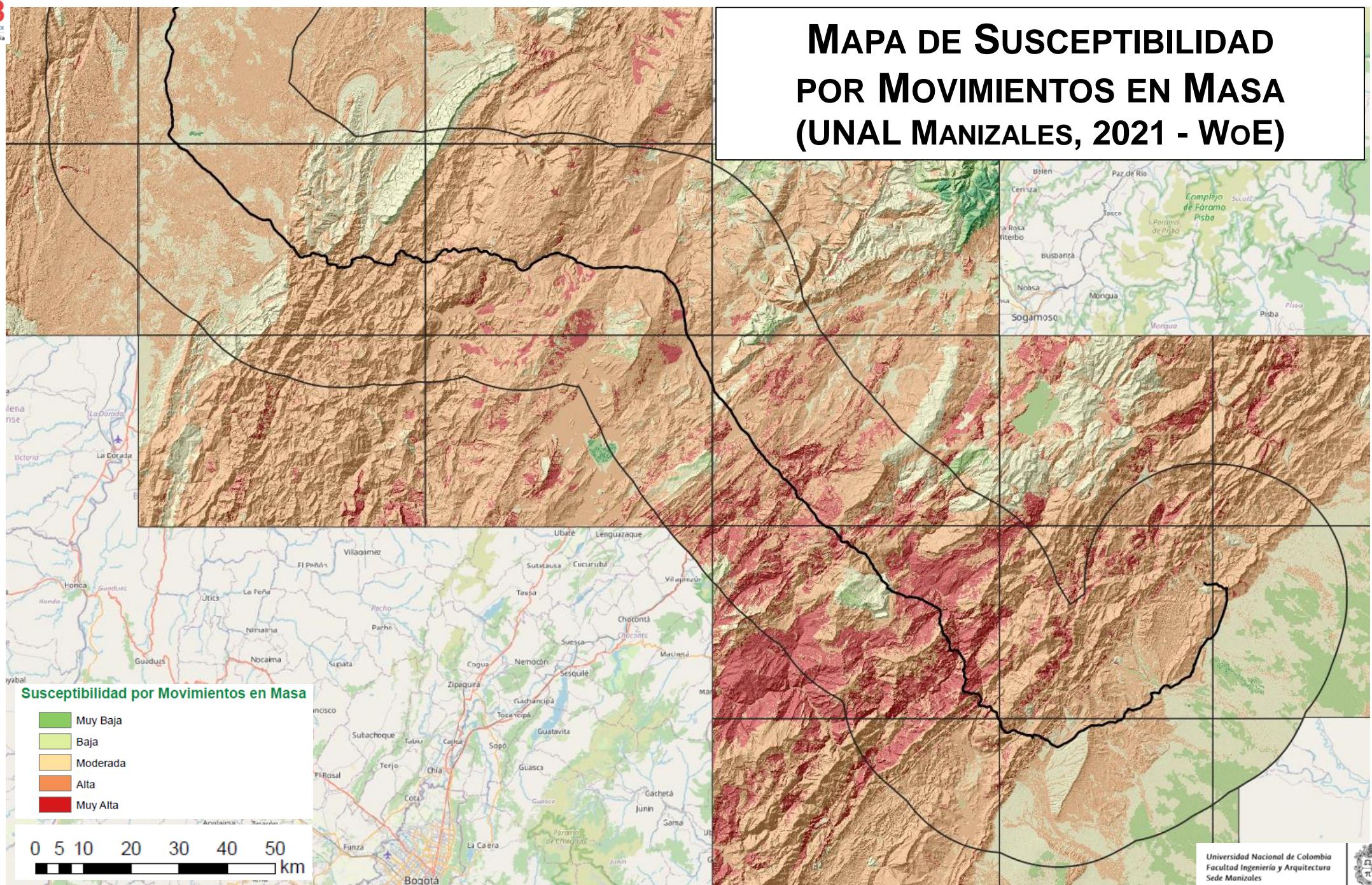


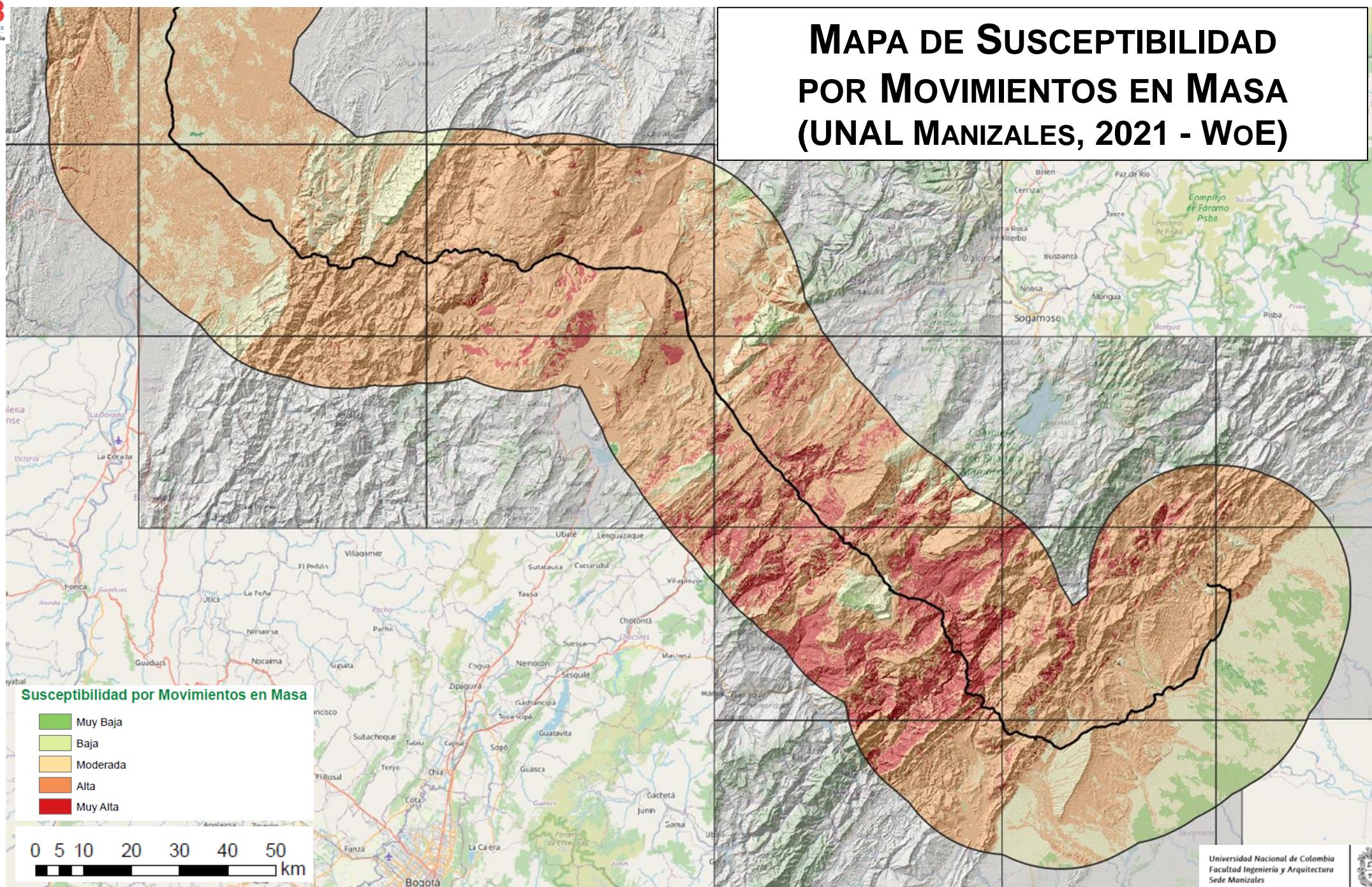


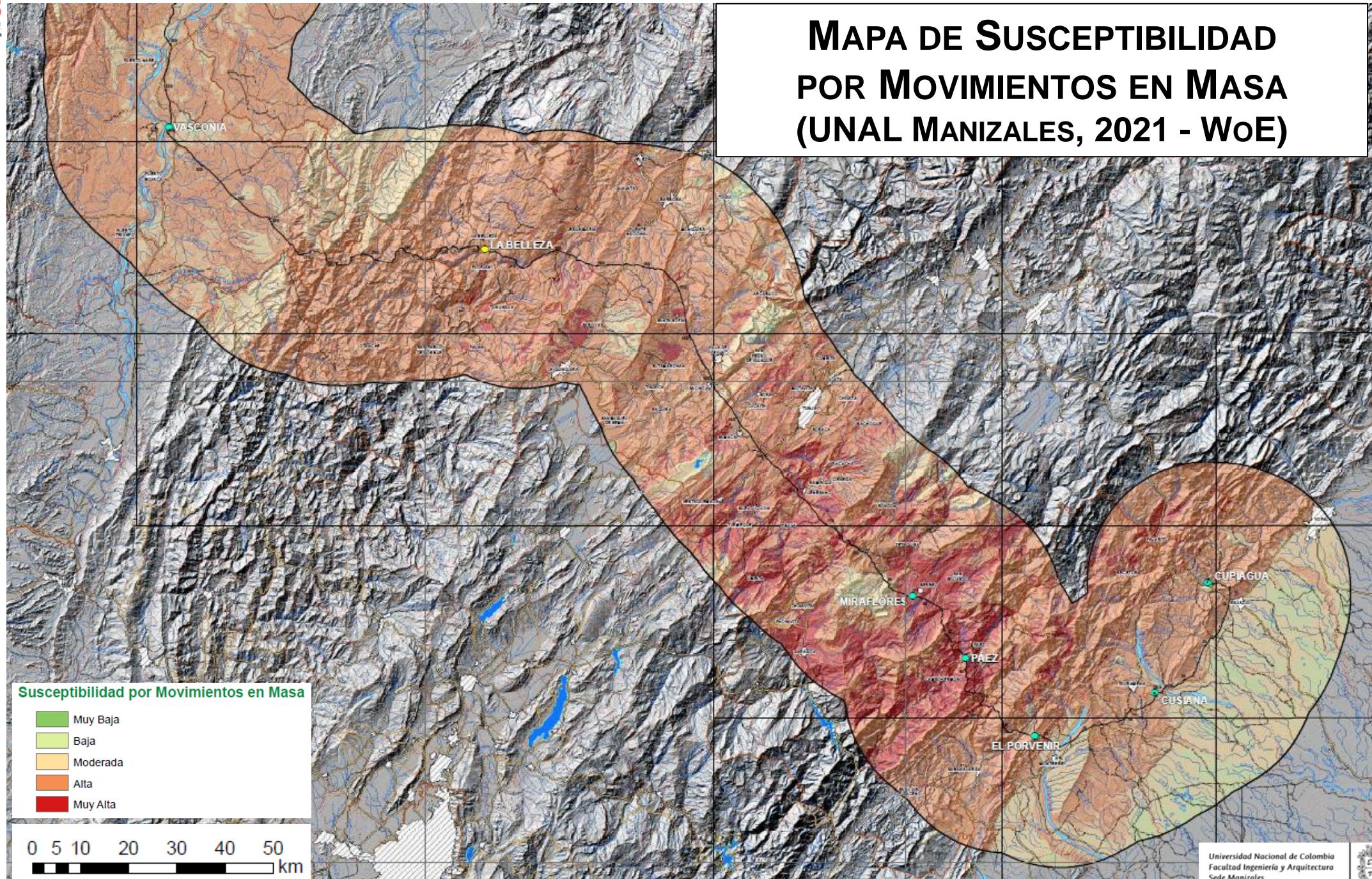
ÁREA DE INFLUENCIA

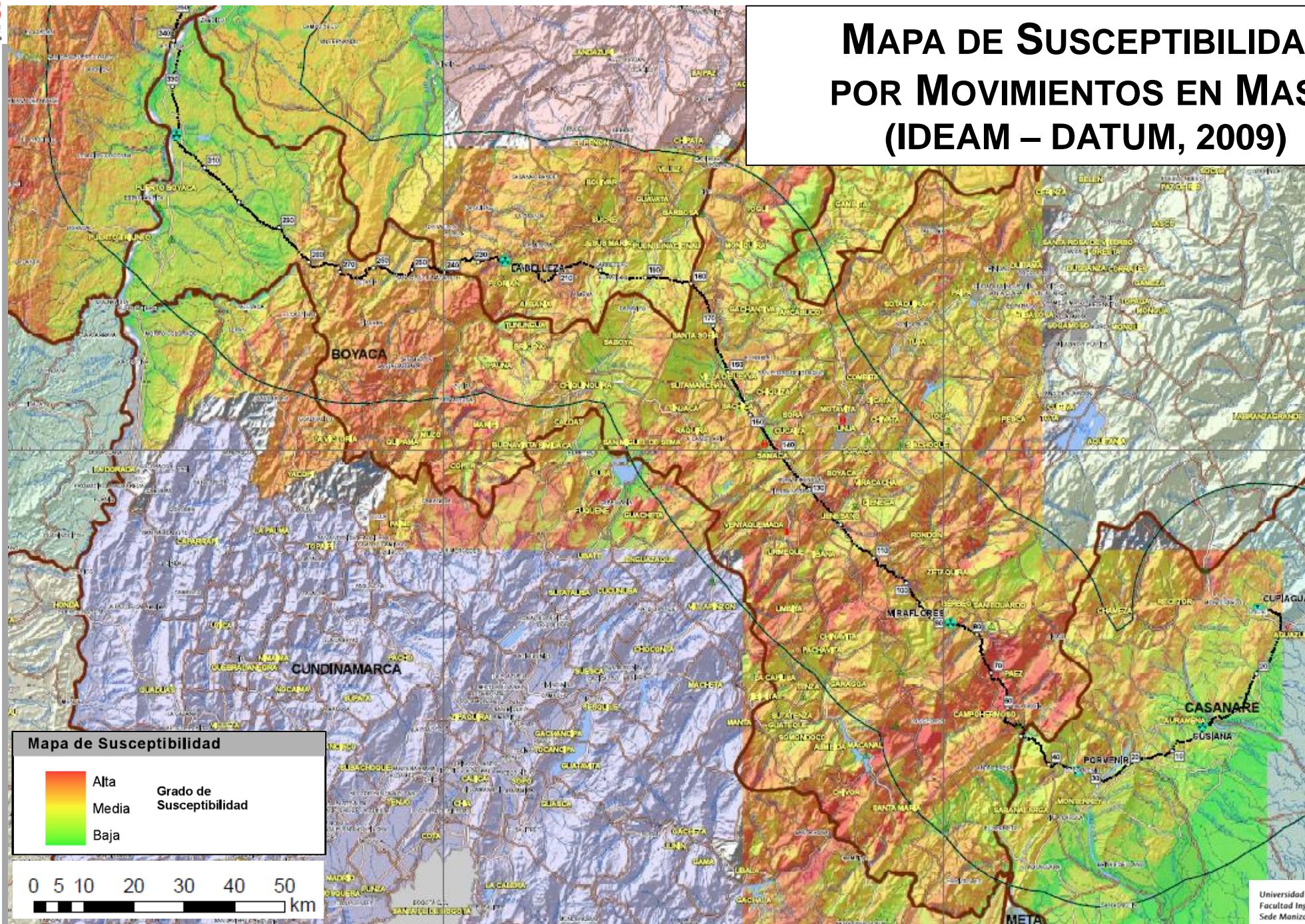




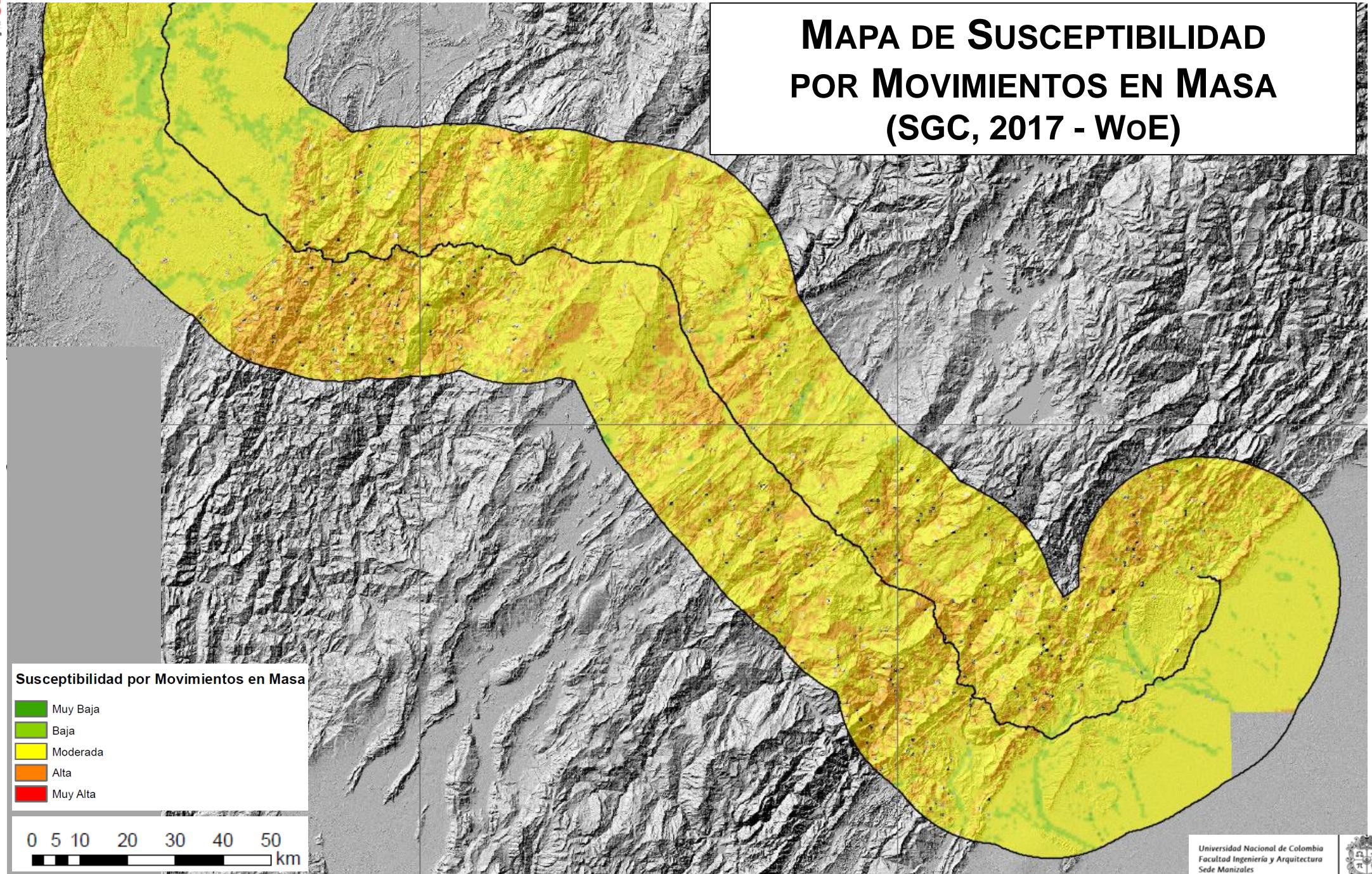


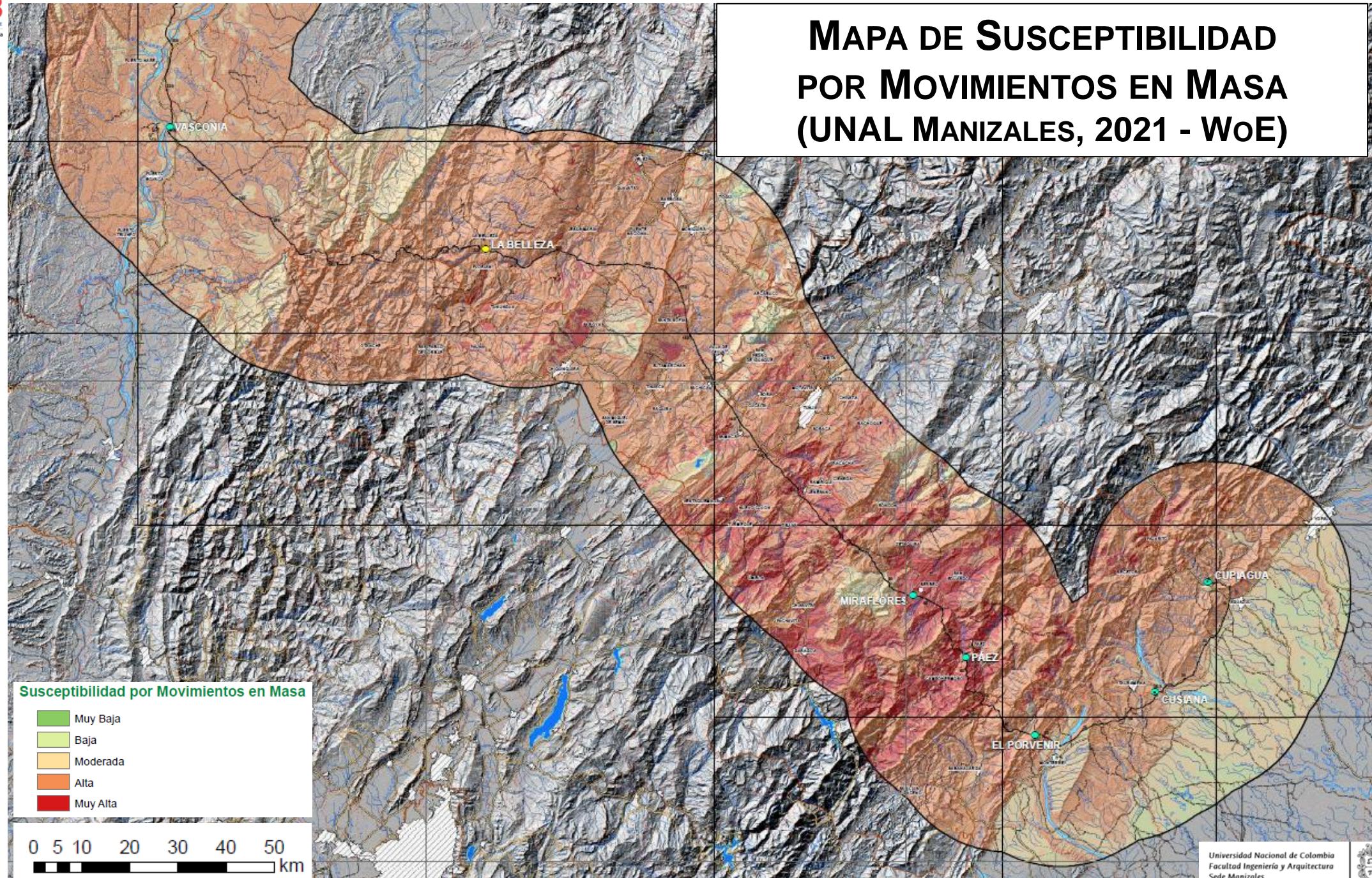






MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA (SGC, 2017 - WoE)







SECTOR DE LA PIÑALERA (PK 35.500)

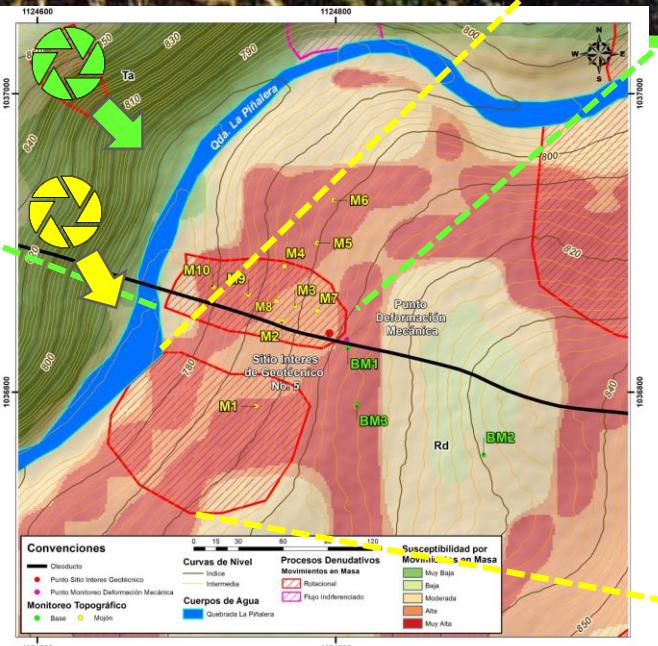
CONSTRUCCIÓN DEL OLEODUCTO CENTRAL DE COLOMBIA **Sector Cusiana - La Belleza (220 Km)**



**OLEODUCTO CENTRAL DE COLOMBIA S.A., OCESA
TECHINT - COTECOL
ZASA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA LTDA, SLITZ LTDA**

DESLIZAMIENTO ROTACIONAL OCURRIDO Y ESTABILIZADO DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL OLEODUCTO DE OCENSA (04/12/1996)

DESLIZAMIENTO ROTACIONAL OCURRIDO Y ESTABILIZADO ANTES DE LA CONSTRUCCIÓN DEL OLEODUCTO DE OCENSA





1. Se realizó y validó un análisis cuantitativo de susceptibilidad por movimientos en masa por pesos de evidencia (método estadístico bivariado, basado en el teorema de Bayes), superando un método semicuantitativo, basado en criterio experto.
2. El rendimiento del modelo se evaluó con la métrica del área bajo la curva ROC. Su resultado fue del 87.9% (superior al 70.0% del mapa del SGC (2017)). No hay dato para el mapa de IDEAM-DATUM (2009).
3. Los 3 mapas tienen igual escala de trabajo (1:100,000), pero la resolución del nuevo mapa es 9 veces superior respecto a los otros dos (casi 90'000,000 de píxeles de 30x30 m. Requirió 62.5 de memoria RAM).
4. El nuevo mapa se considera más representativo y confiable porque emplea un método probabilístico bivariado con mayor cantidad de evidencias de deslizamiento; mayor cantidad de variables explicativas independientes; reducción de dimensiones manteniendo la varianza explicada y con un rendimiento superior al aceptado por la comunidad científica.





Muchas gracias
por su
atención!!!

