



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



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

IPG 2023

INTERNATIONAL PIPELINE GEOTECHNICAL CONFERENCE

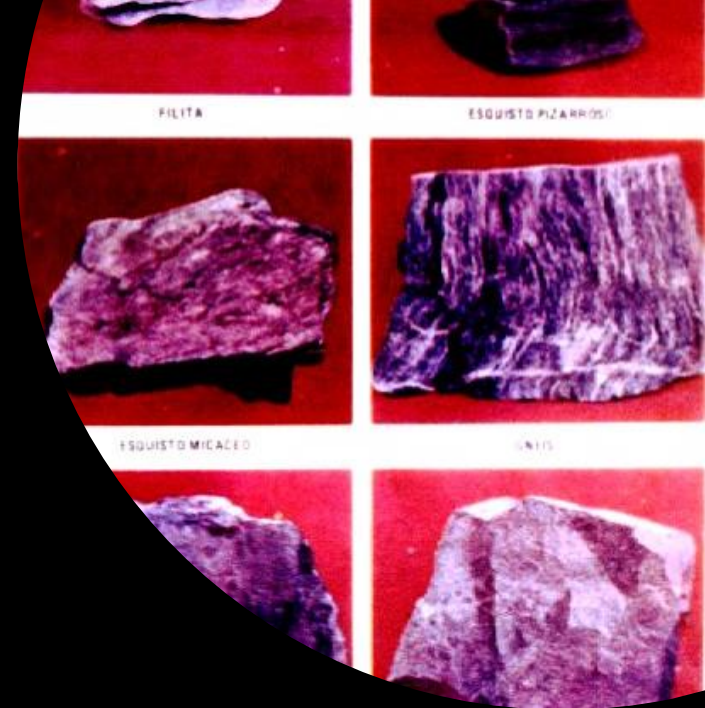
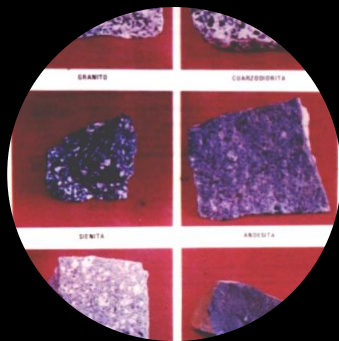
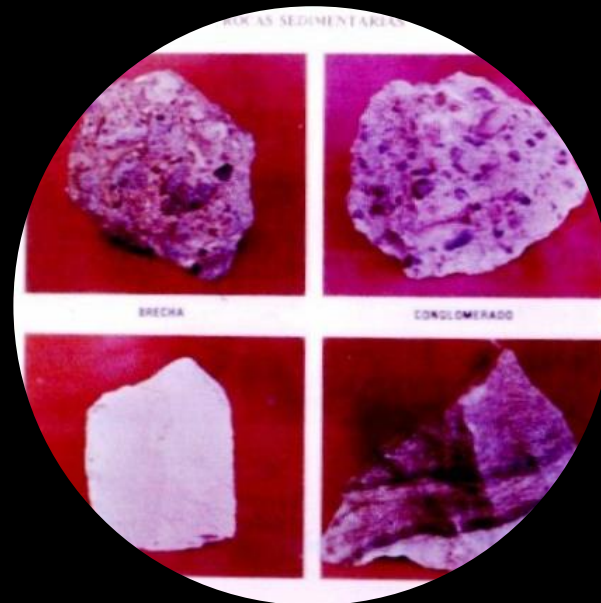
23 y 24 de Noviembre, Bogotá D.C. - Colombia

Rasgos Geológico - Estructurales



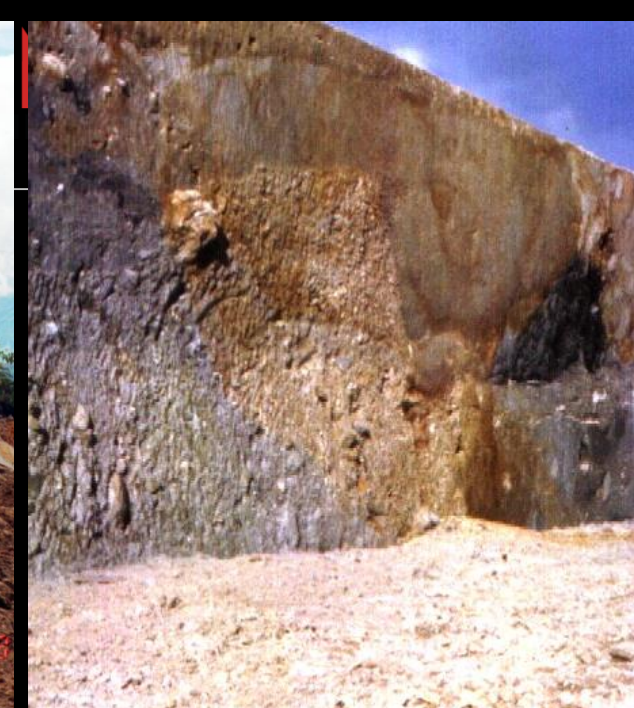


Estado, condición e intervención de macizos

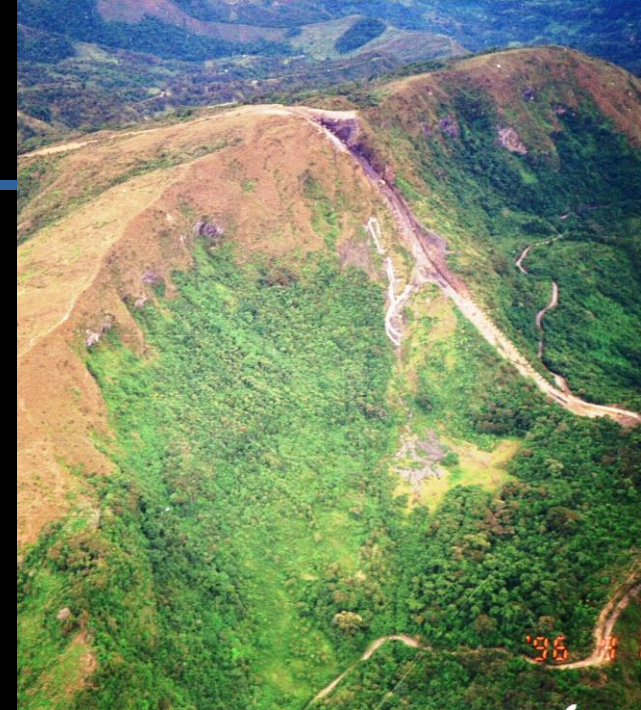
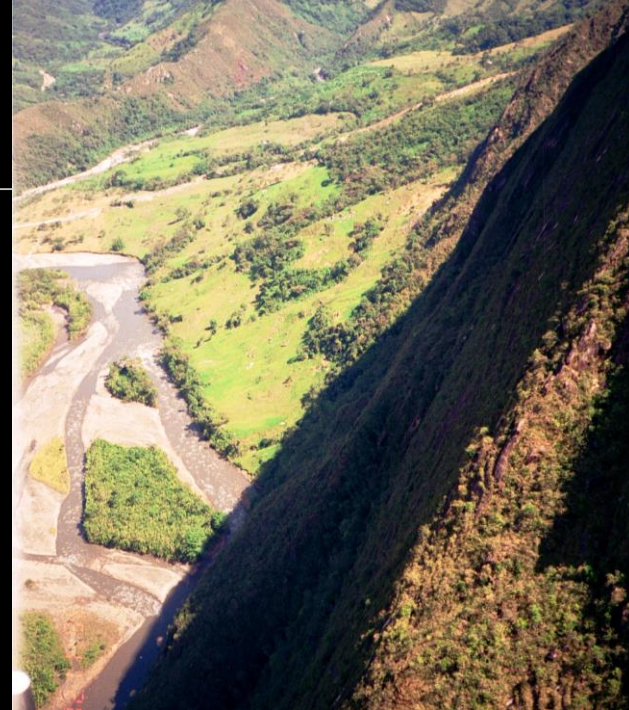


Rasgos mineralógicos





Rasgos genéticos y texturales



Pendientes y longitudes de pendientes

Sismos Detonantes

(efectos del sismo de
Tauramena, 1995)



'96 12 3

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 Lluvias detonantes

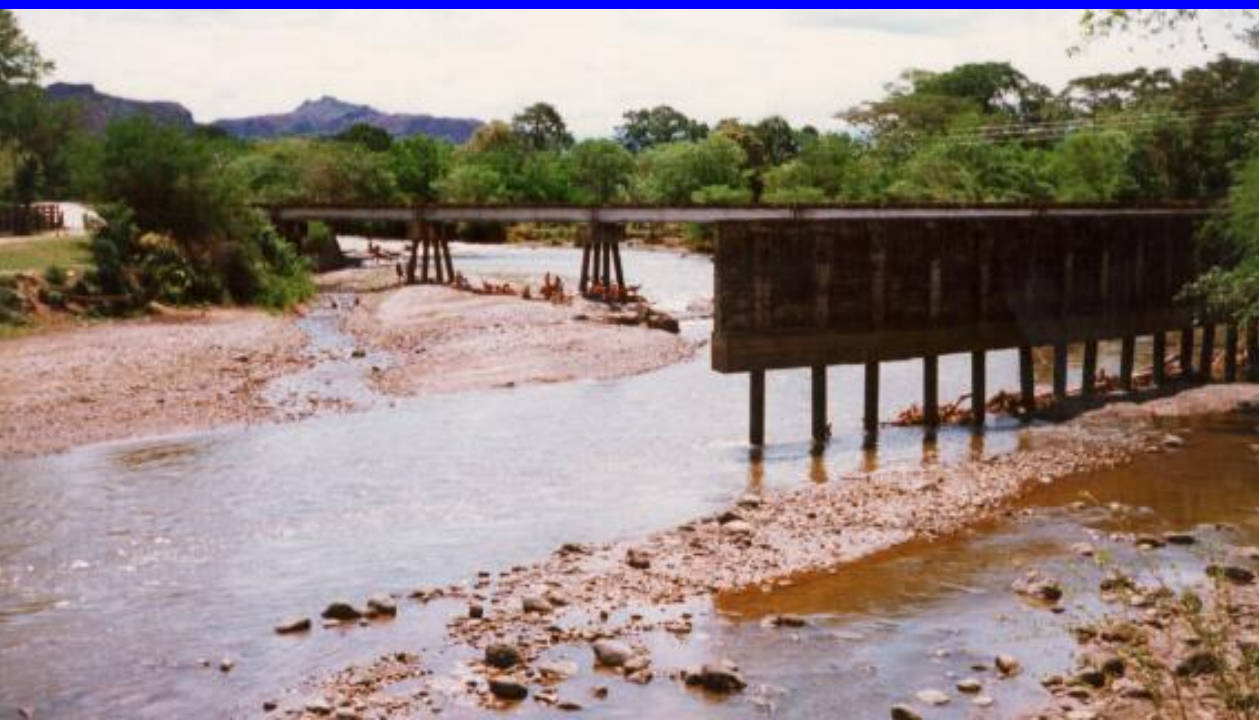


6ª CONFERENCIA INTERNACIONAL GEOTECNIA DE DUCTOS

OCENSA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales



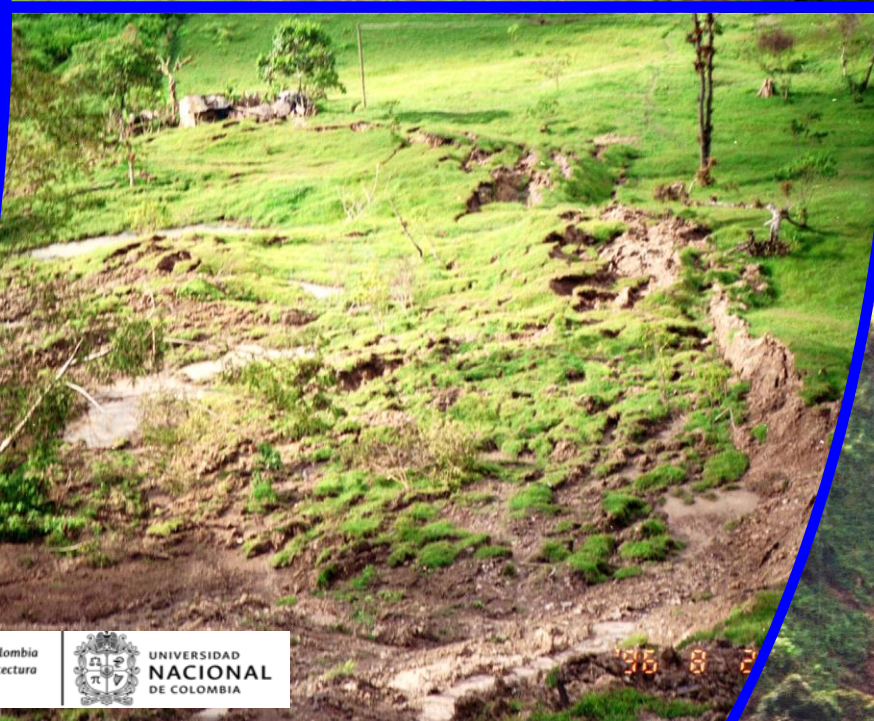


Erosión fluvial e interfluvial

Movimientos en masa



Movimientos en masa





Calidad constructiva

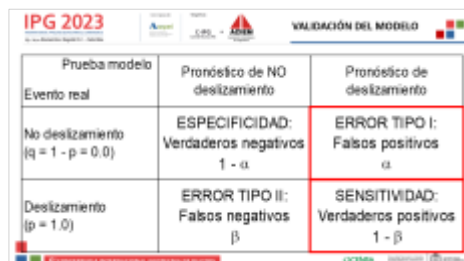
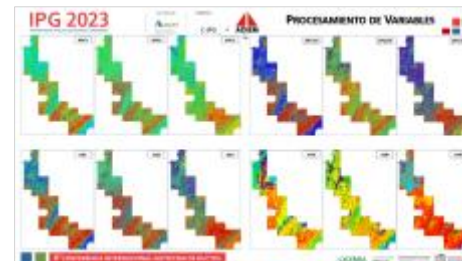
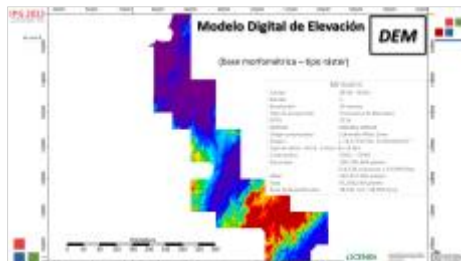
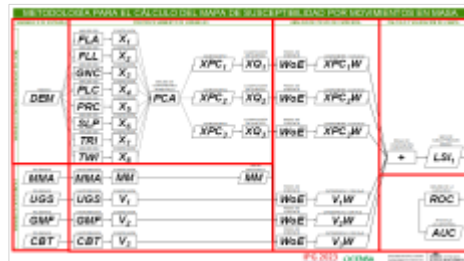


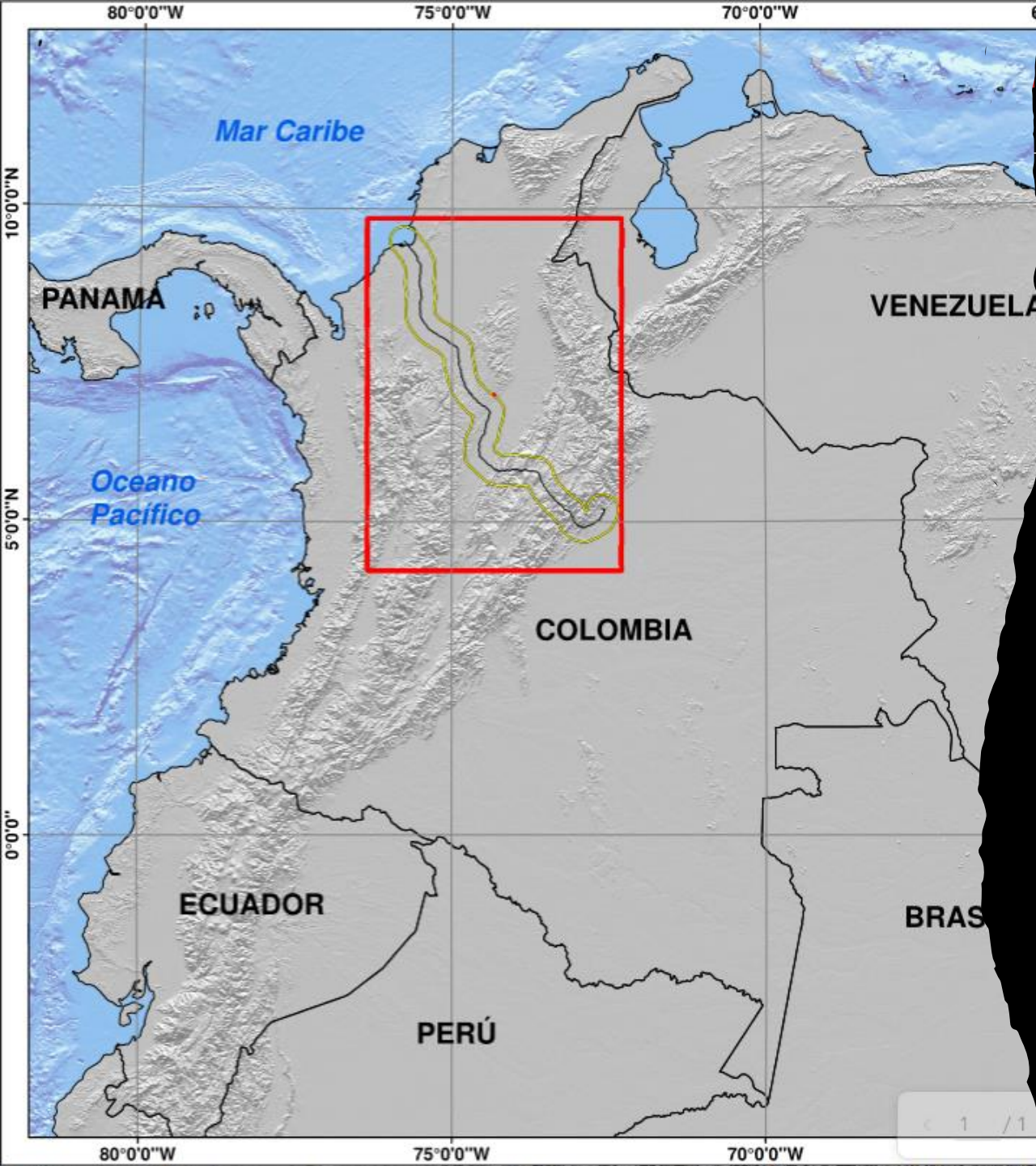


Análisis de Susceptibilidad por Movimientos en Masa en Sistemas de Transporte de Hidrocarburos

Insumo para:

- Evaluación de Geoamenazas**
- Emisión de Alertas Tempranas**
- Gestión de Riesgos para la Integridad
y para la Seguridad de Procesos**





LOCALIZACIÓN



Oleoducto Central de Colombia

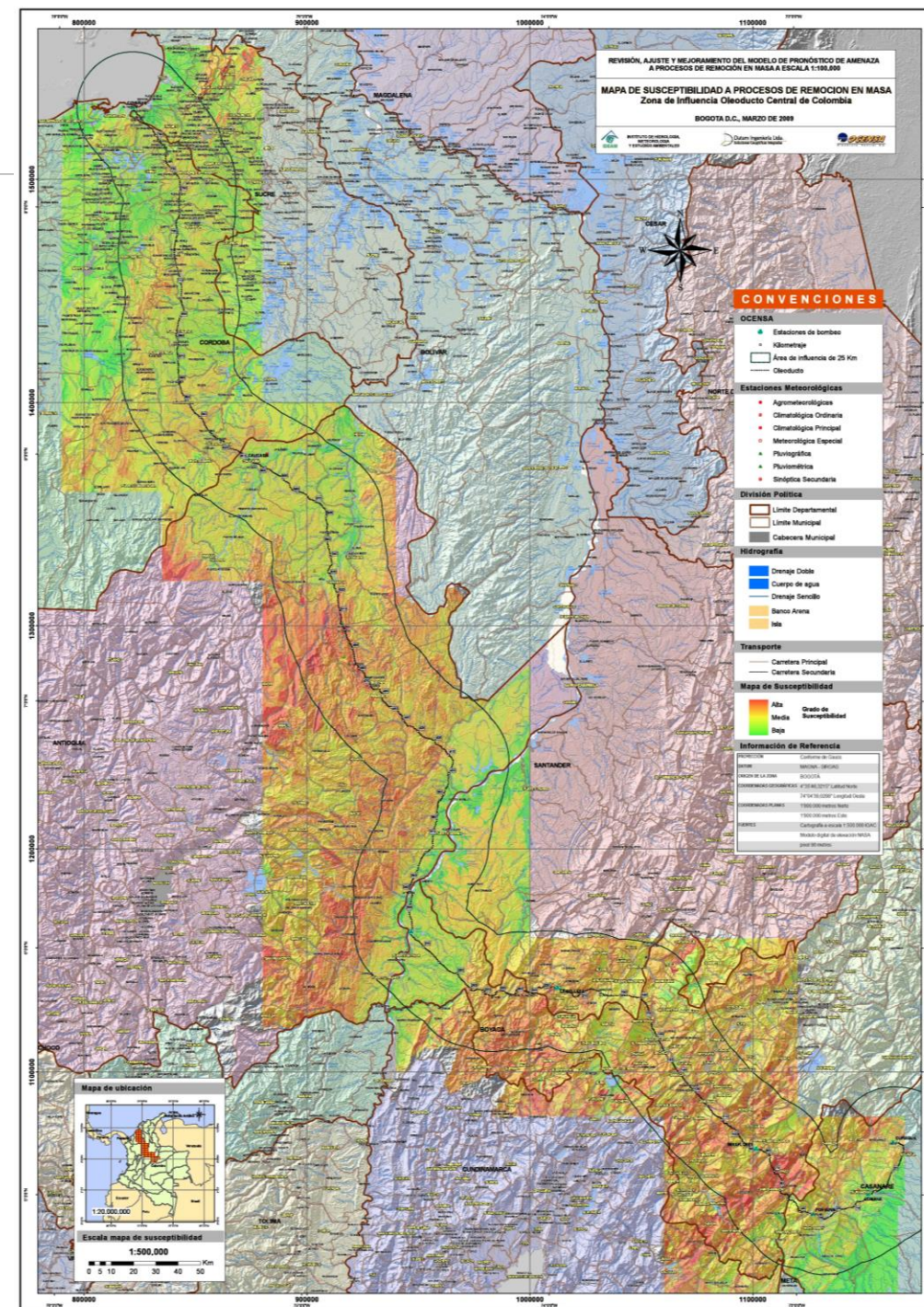
DESCRIPCIÓN GENERAL

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**

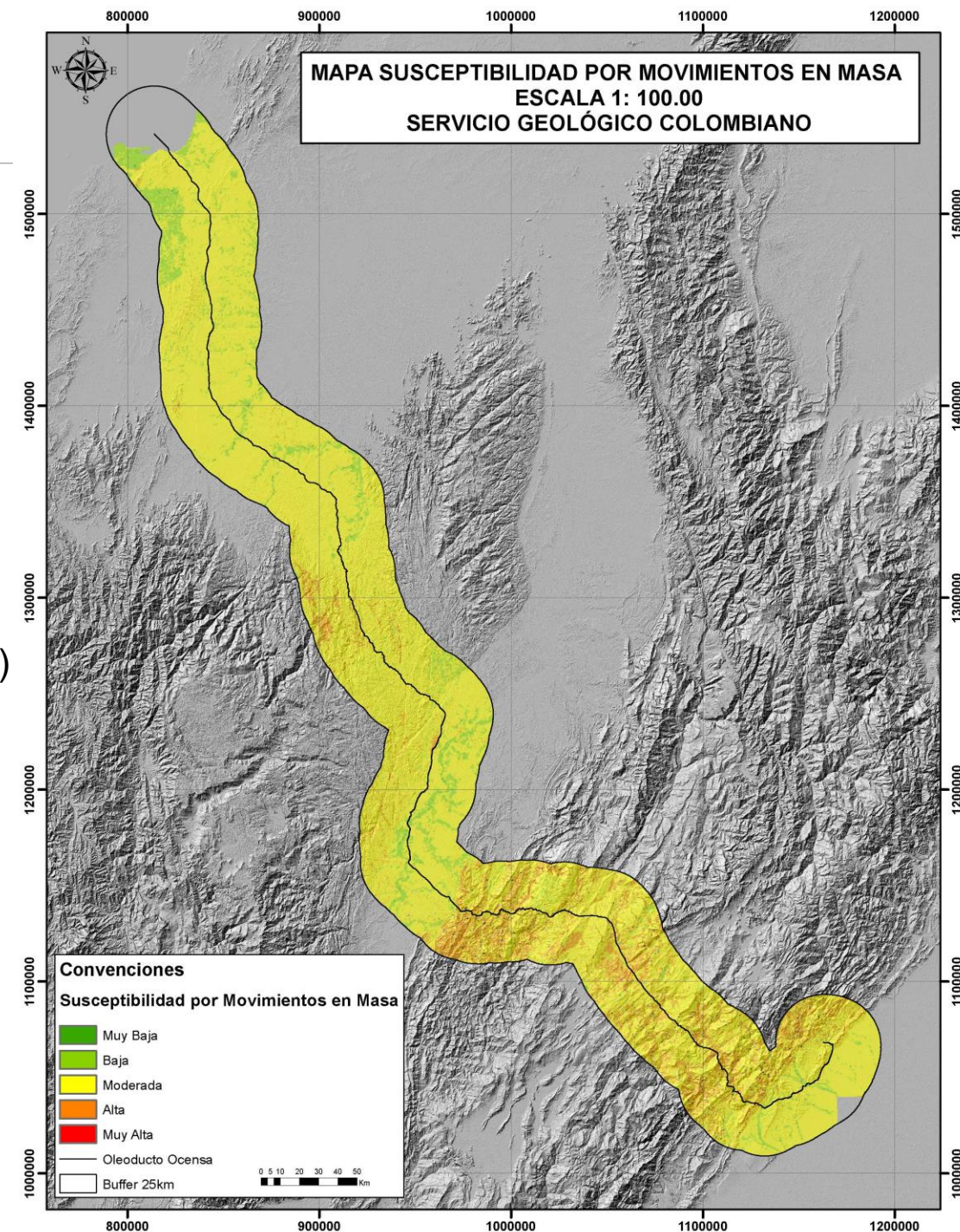
Método de análisis: **Pesos de Evidencia** (estadístico bivariado)

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





Área de Estudio

Longitud: 863 km

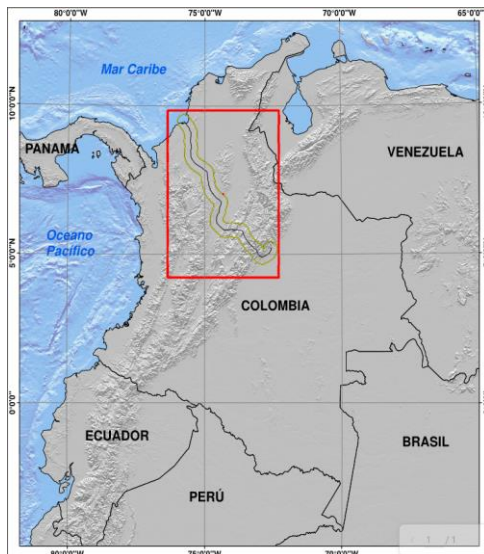
Ancho: 50 km (25 km a cada lado)

Área: 38,595 km²

Área de Análisis

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

Área: 78,541 km²



CONVENCIONES

- Información disponible
- Área de análisis
- Área de estudio
- Oleoducto de OcenSA

Kilometers

0 40 80 120 160 200 240 280 320 360



VARIABLES DEL MODELO



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	categorica
V_2	GMF	Unidades Geomorfológicas	polígono	categorica
V_3	CBT	Usos y Cobeturas del Suelo	polígono	categorica
P	MMA	Inventario de Movimientos en Masa	polígono	booleana
Y	SampPoint	Puntos de Entrenamiento y Validación	punto	binaria

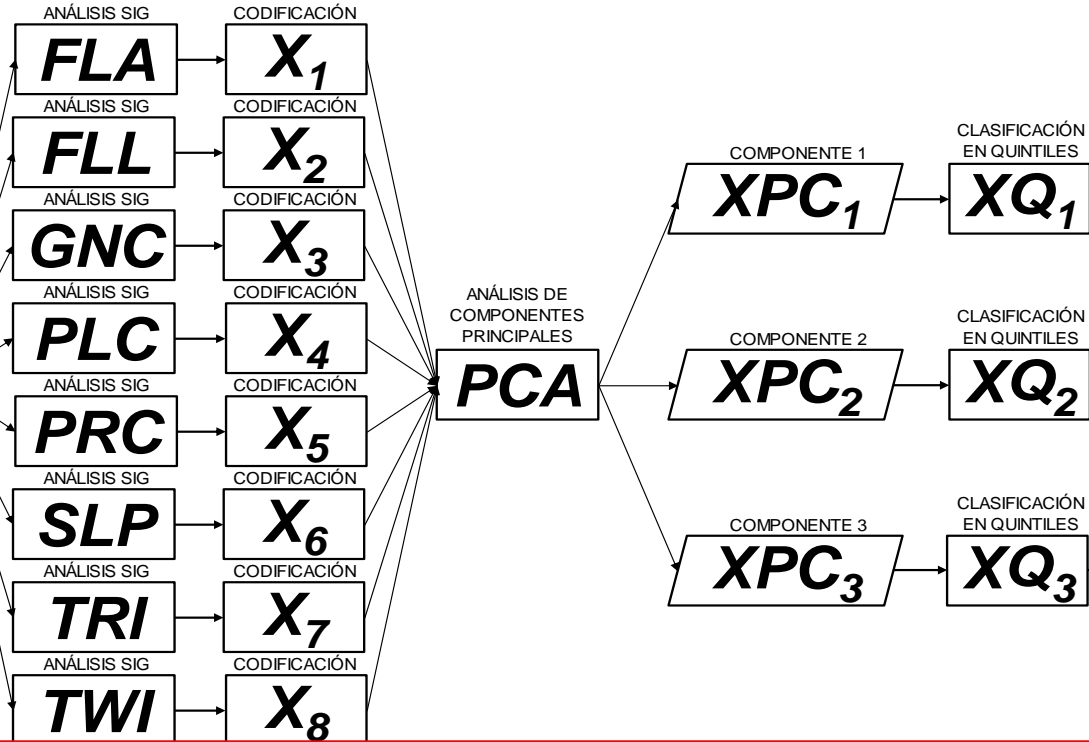
METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

VARIABLES CONTINUAS (DERIVADAS DEL DEM)

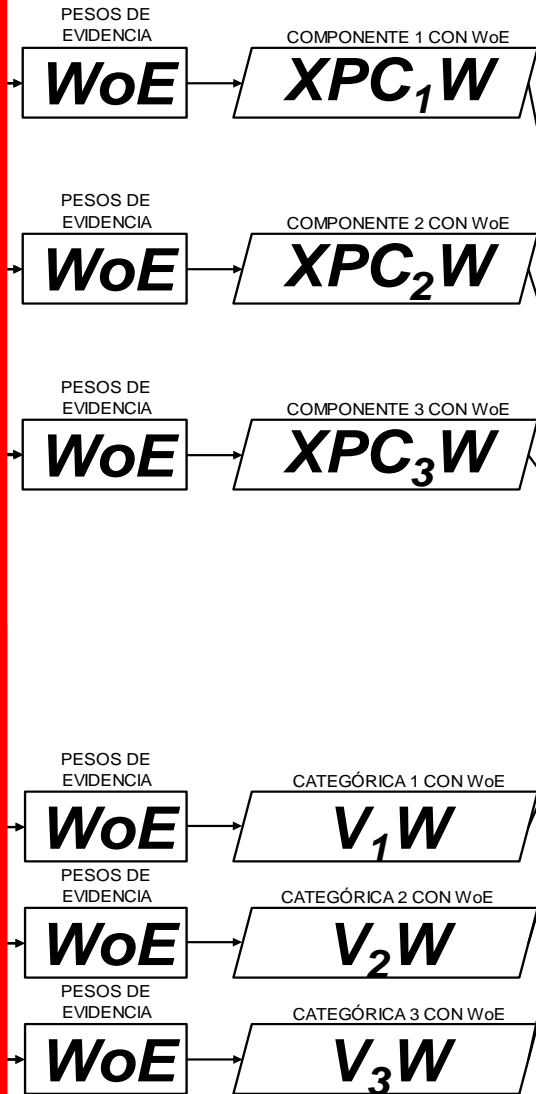
VARIABLES DE ENTRADA



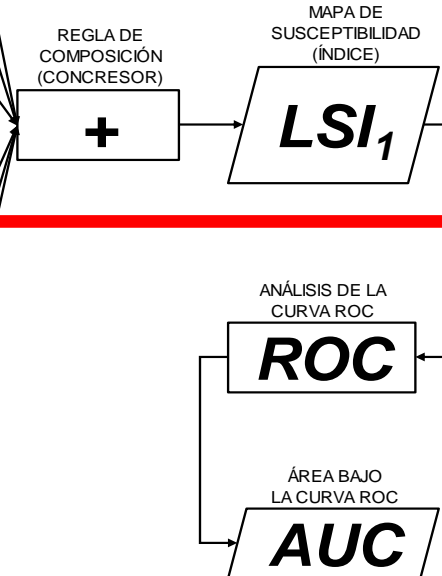
PREPROCESAMIENTO DE VARIABLES



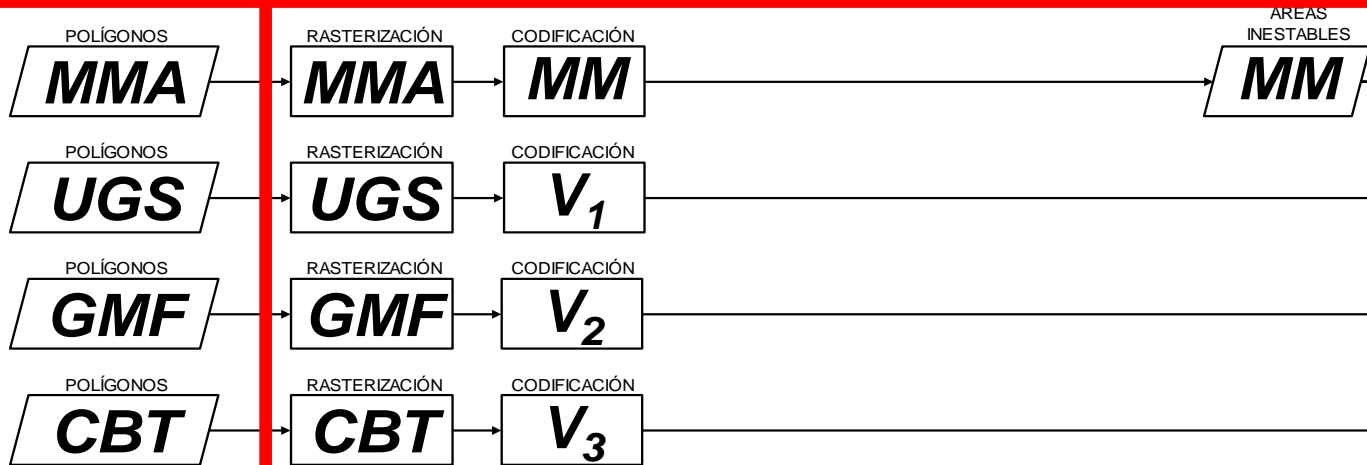
ANÁLISIS DE PESOS DE EVIDENCIA



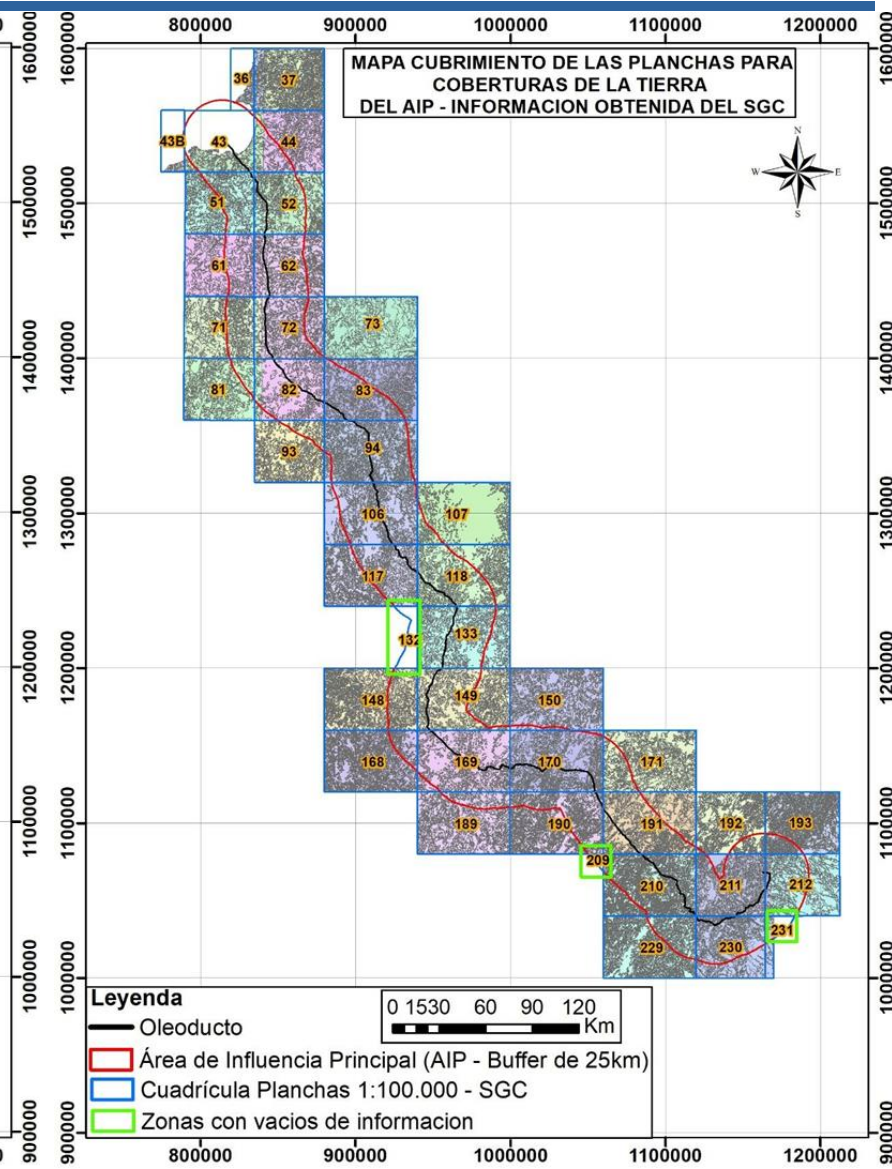
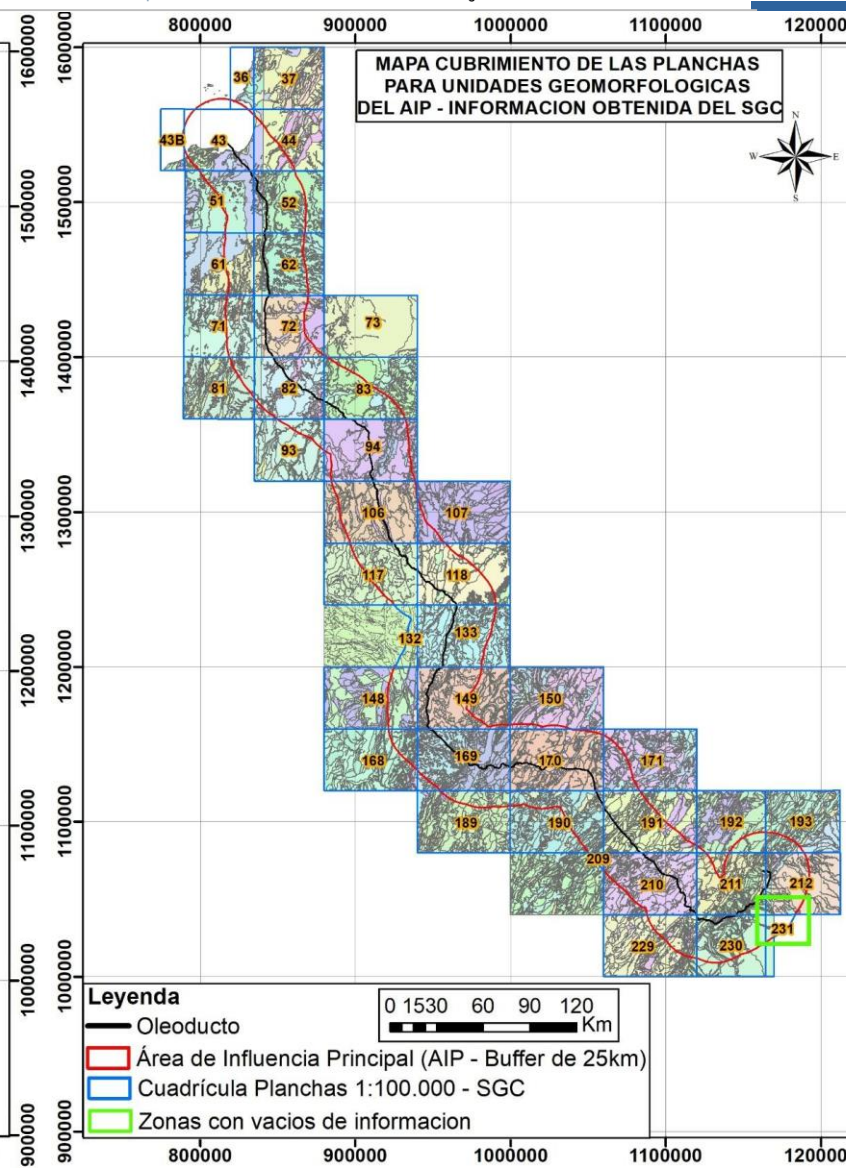
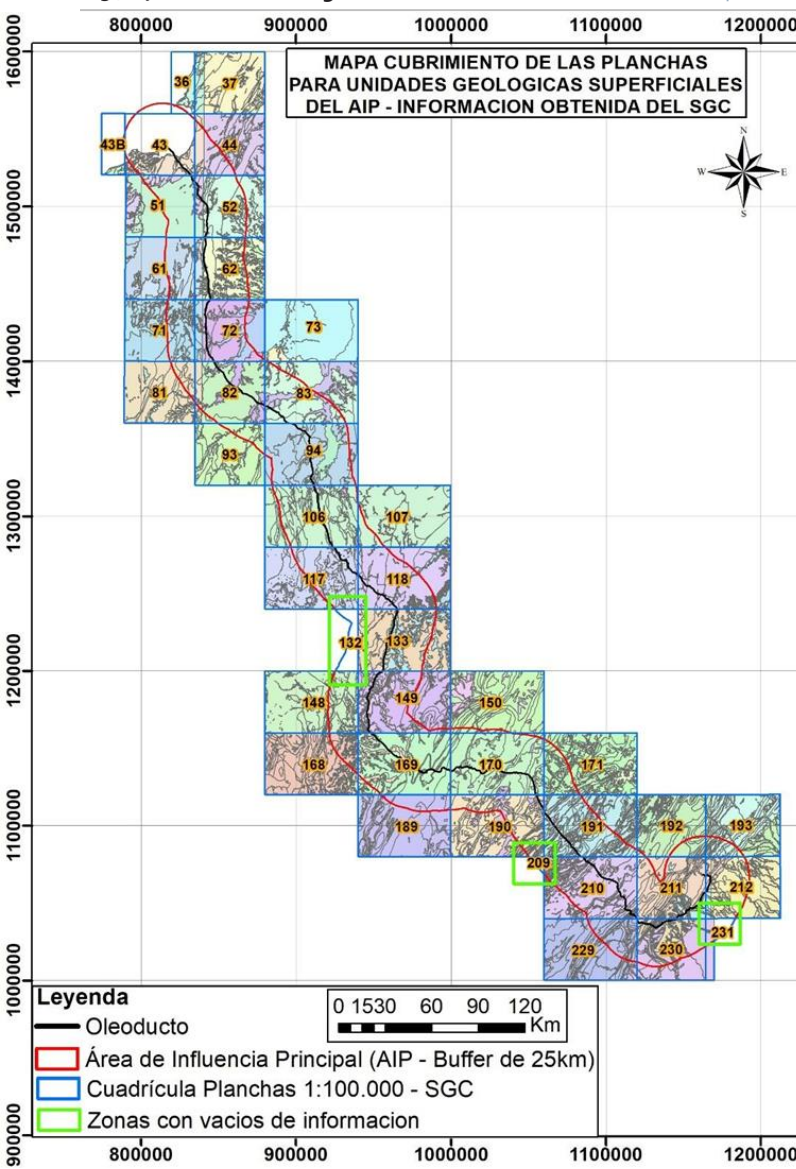
CÁLCULO Y VALIDACIÓN DEL MAPA

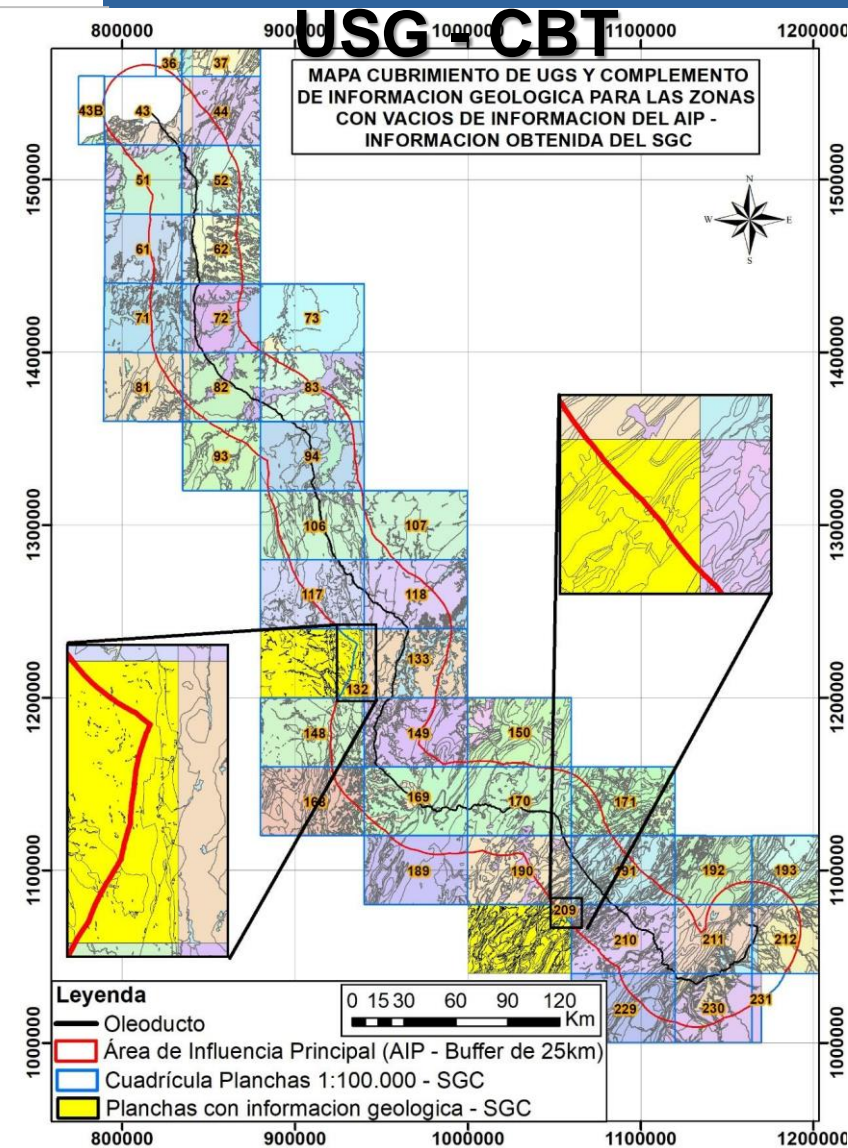
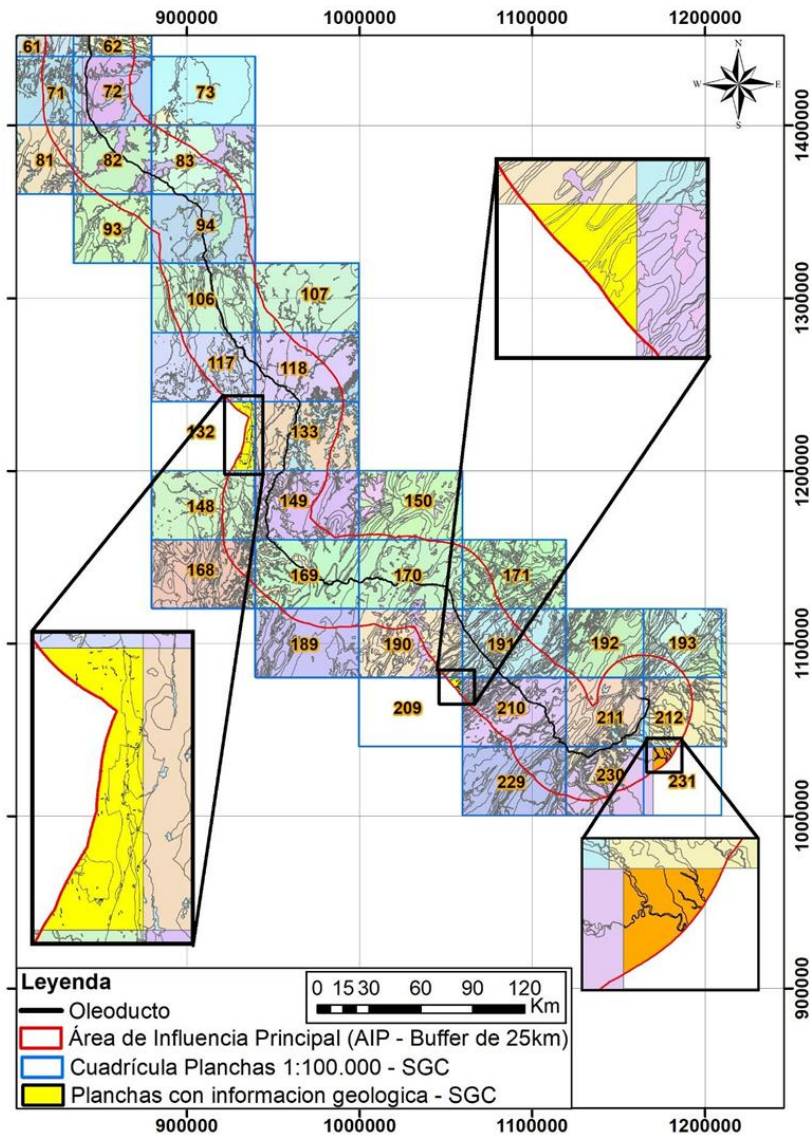


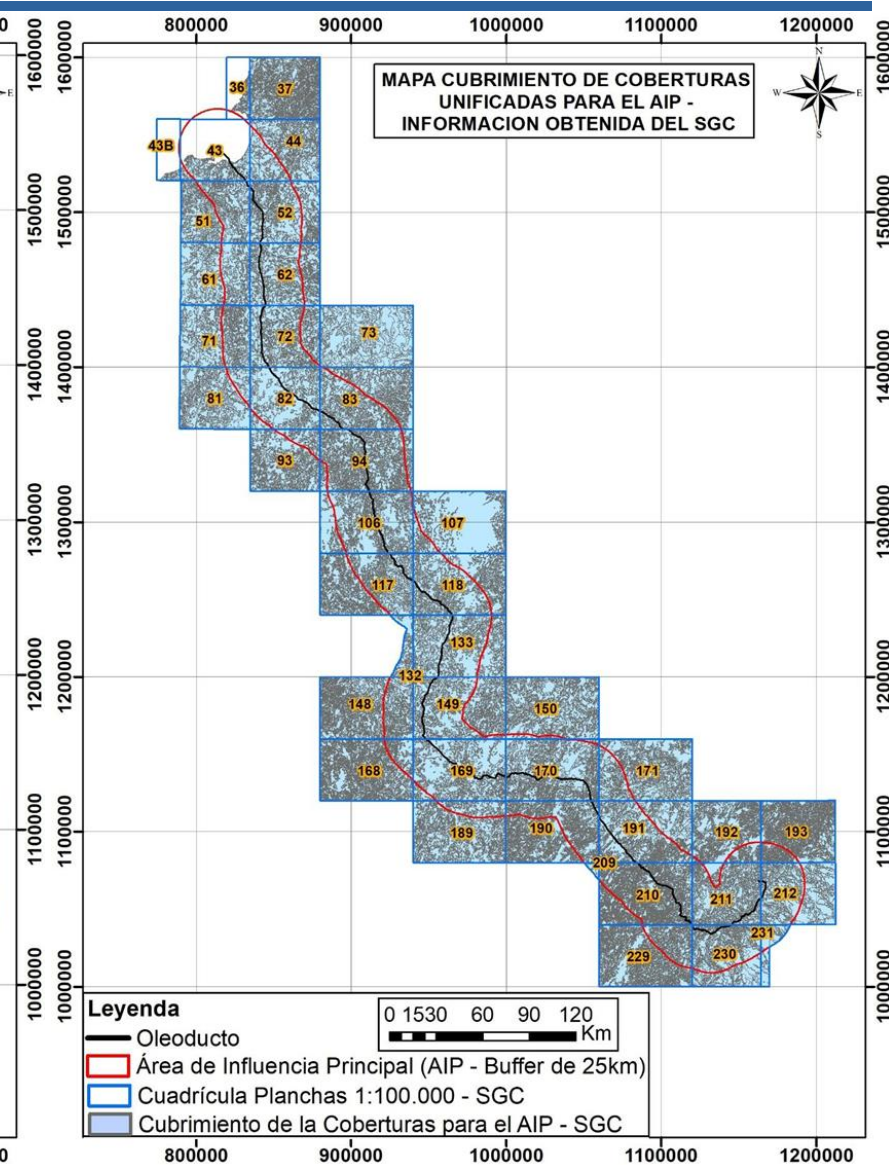
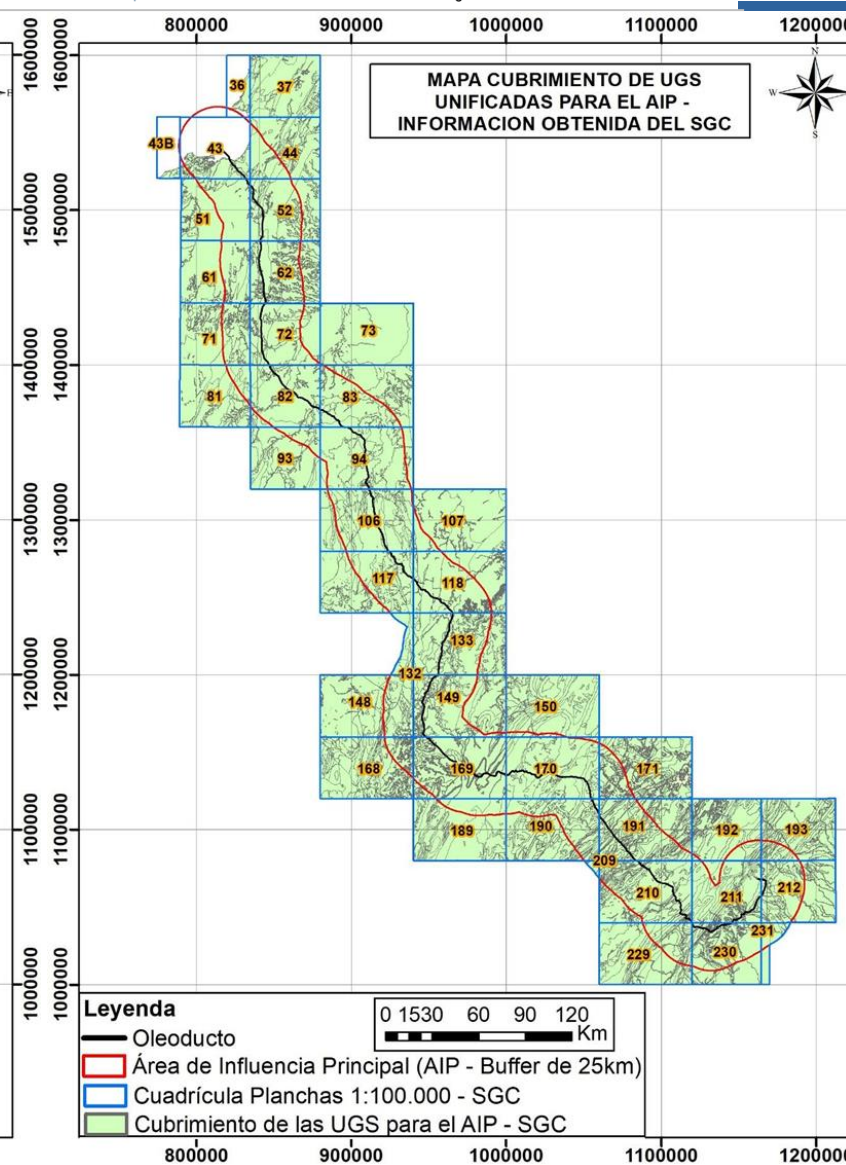
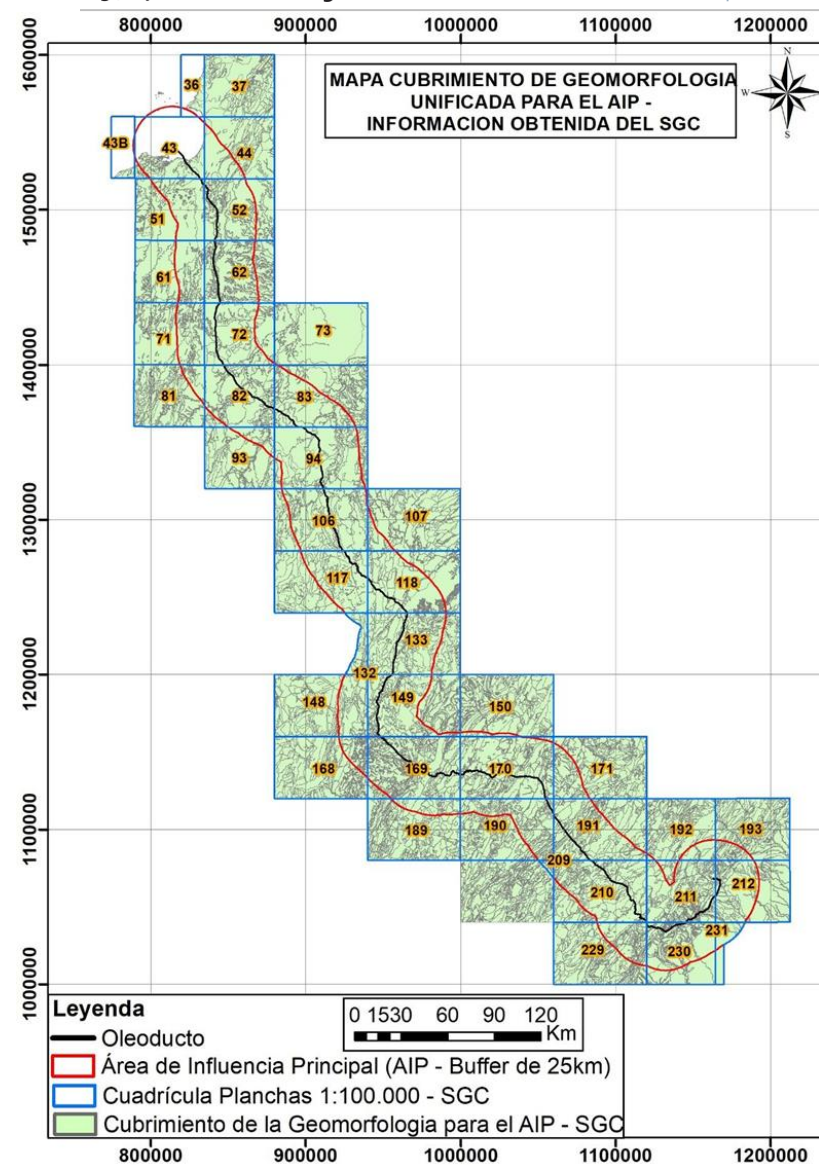
VARIABLES CATEGÓRICAS



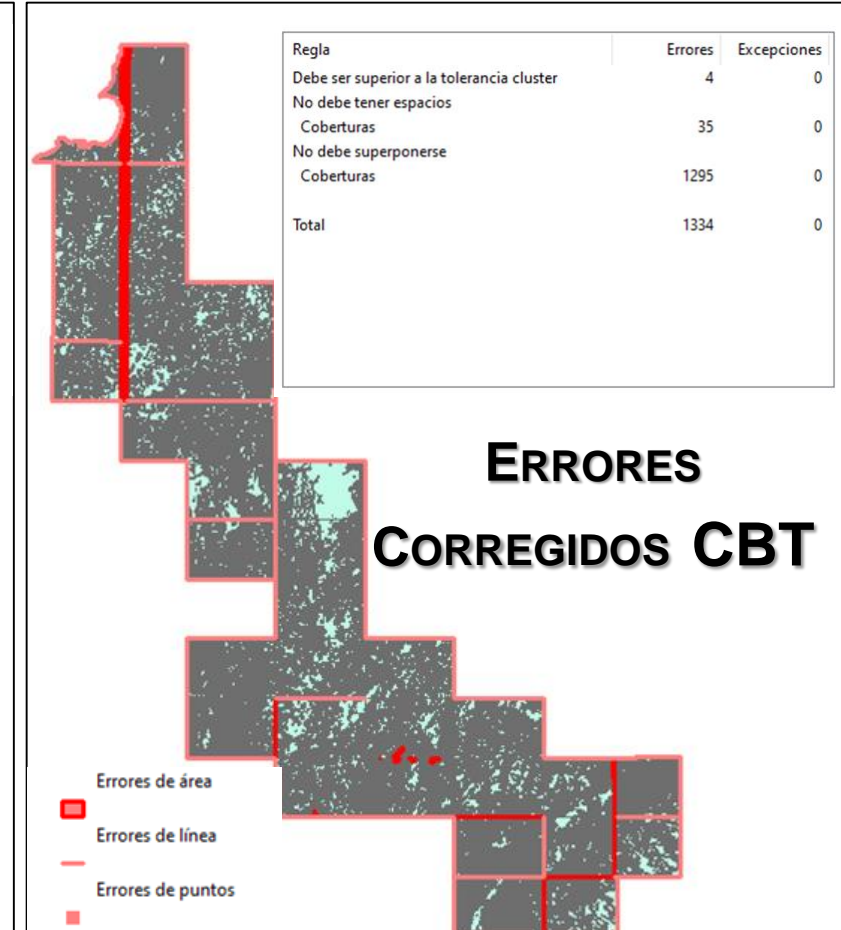
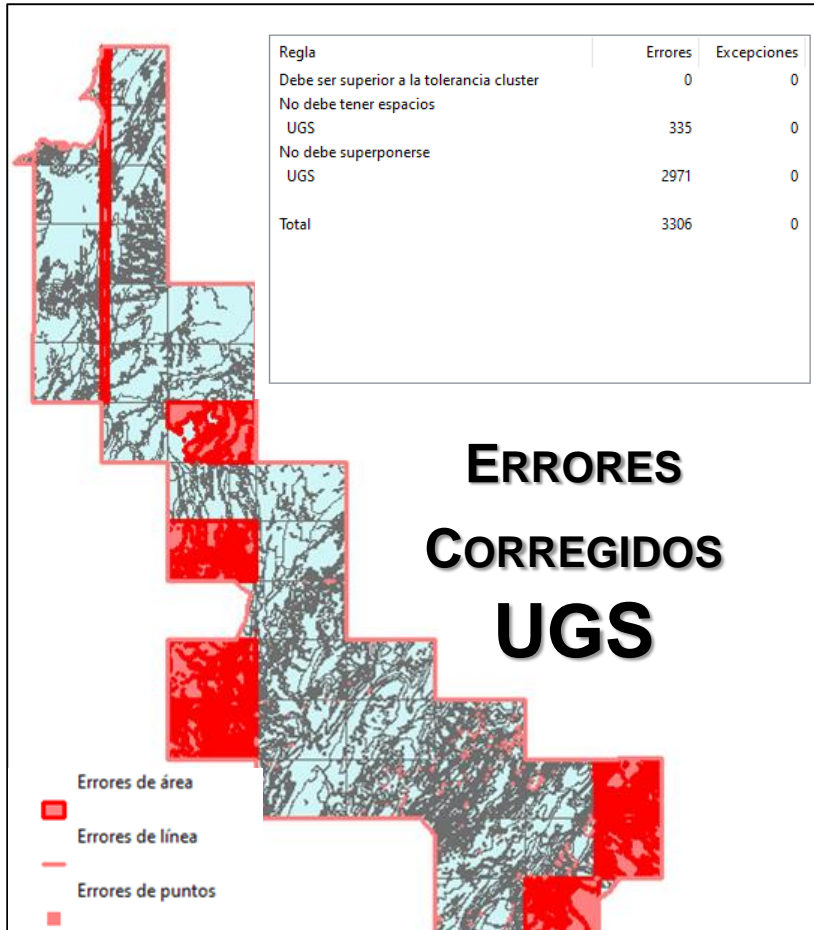
PREPARACIÓN VARIABLES CATEGÓRICAS

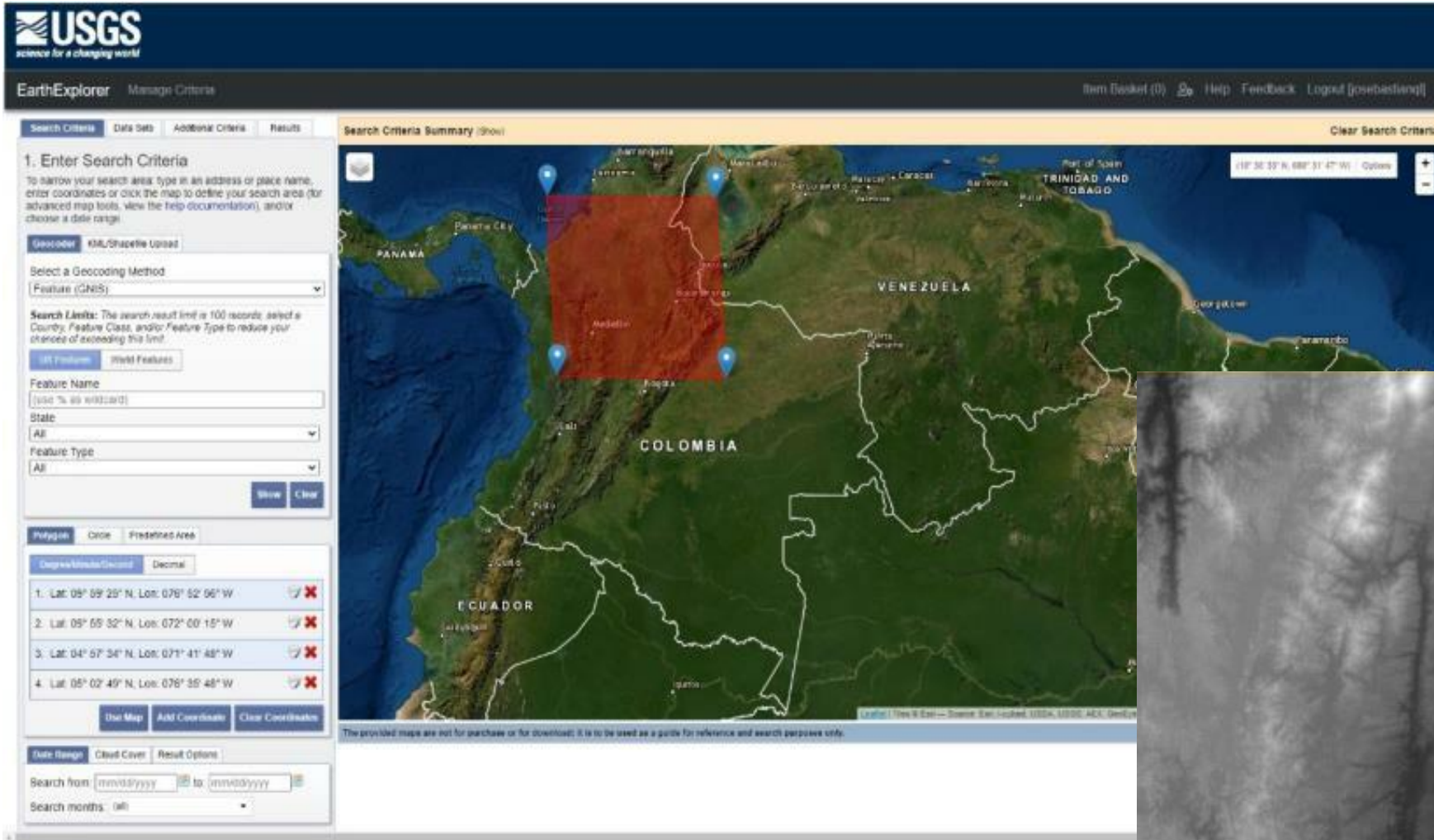






CORRECCIÓN TOPOLÓGICA



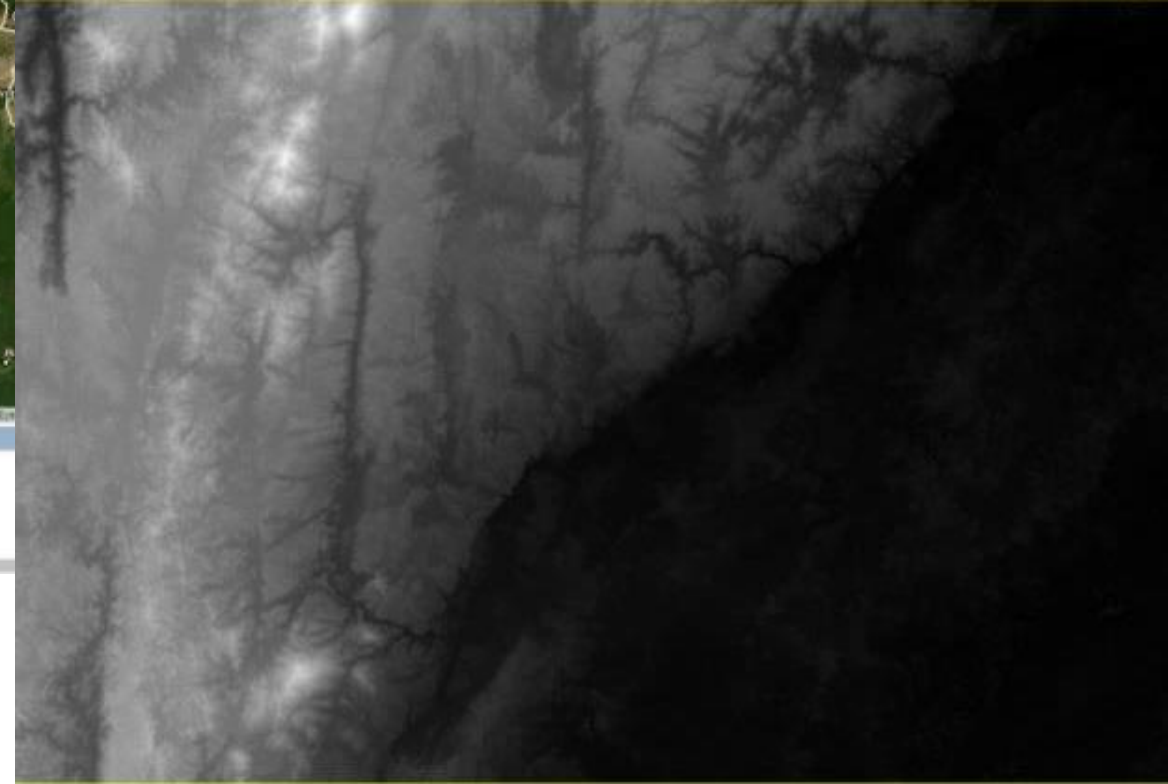


Fuente:

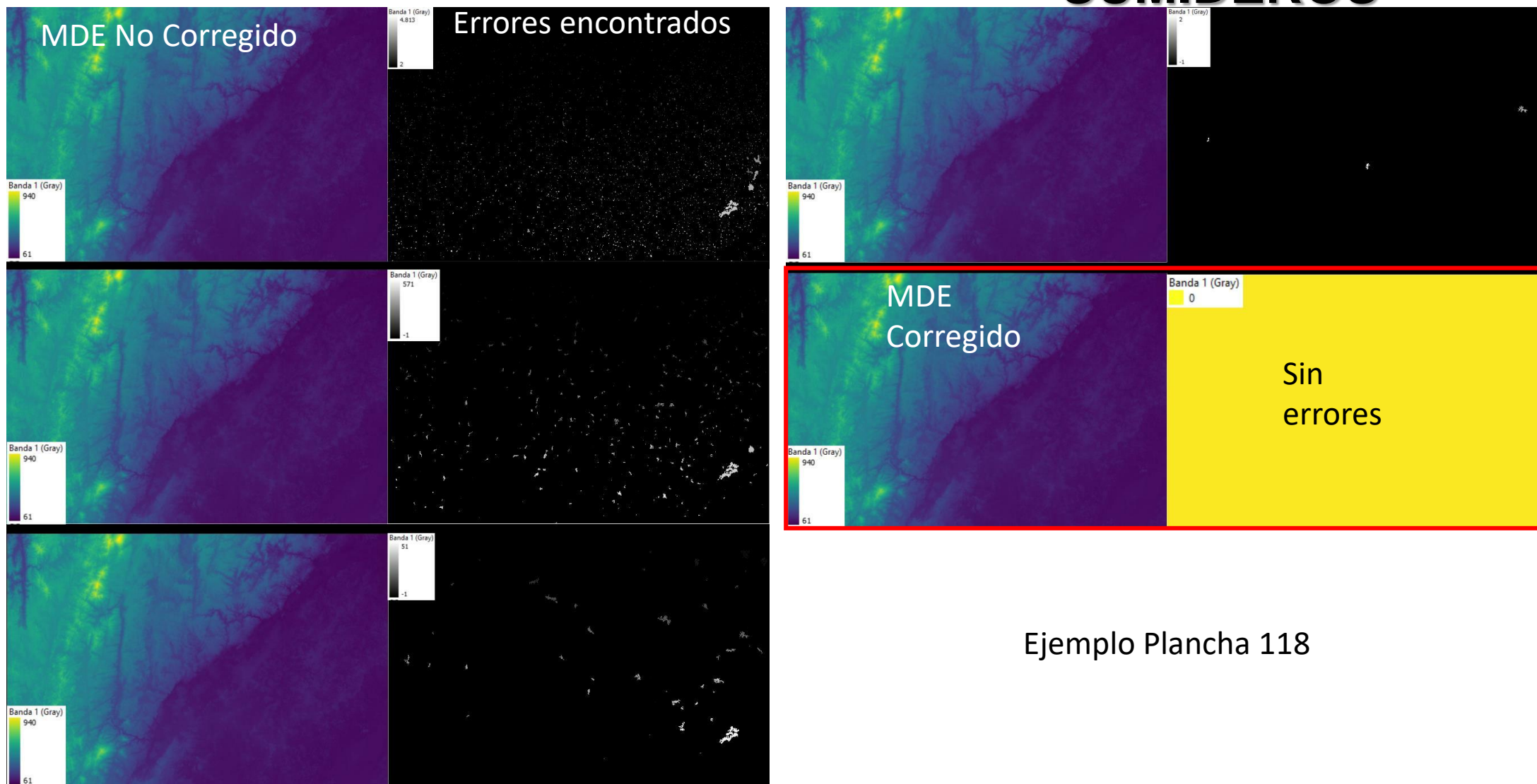
SRTM (resolución 30 m)

Plataforma

EarthExplorer de la USGS



CORRECCIÓN SUMIDEROS



Ejemplo Plancha 118

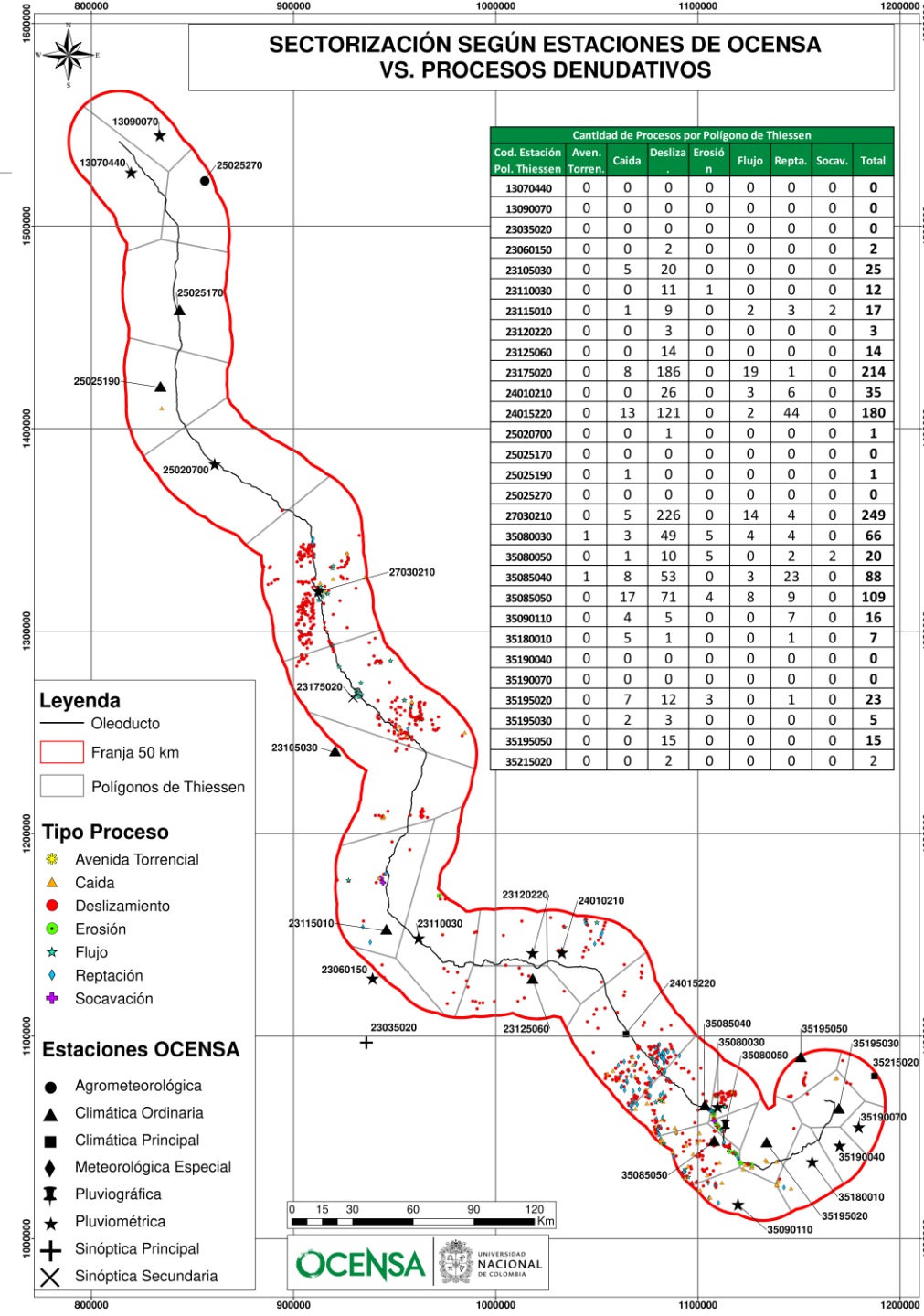


Inventario Nacional

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

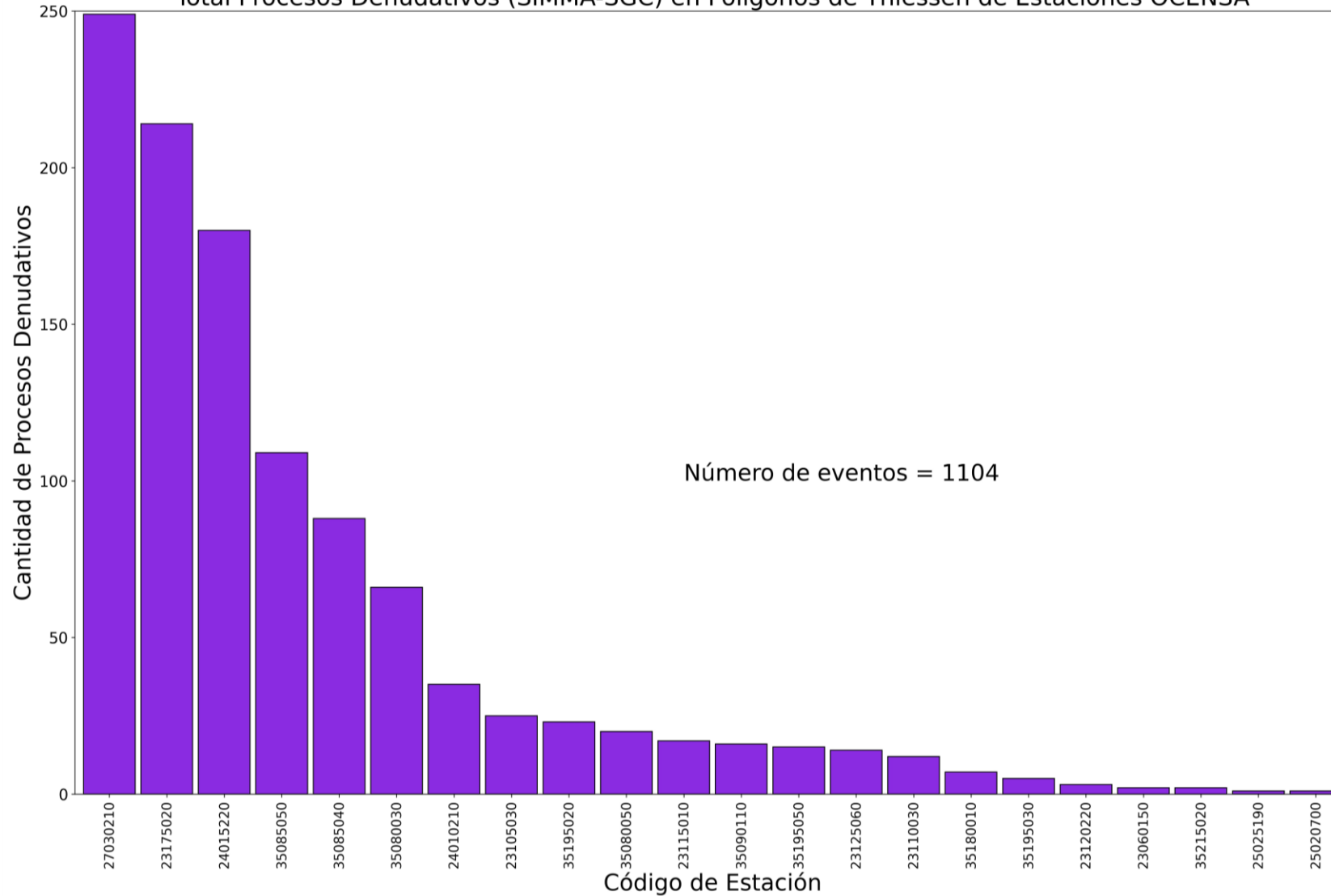
Movimientos en Masa en el Área de influencia 1104 eventos

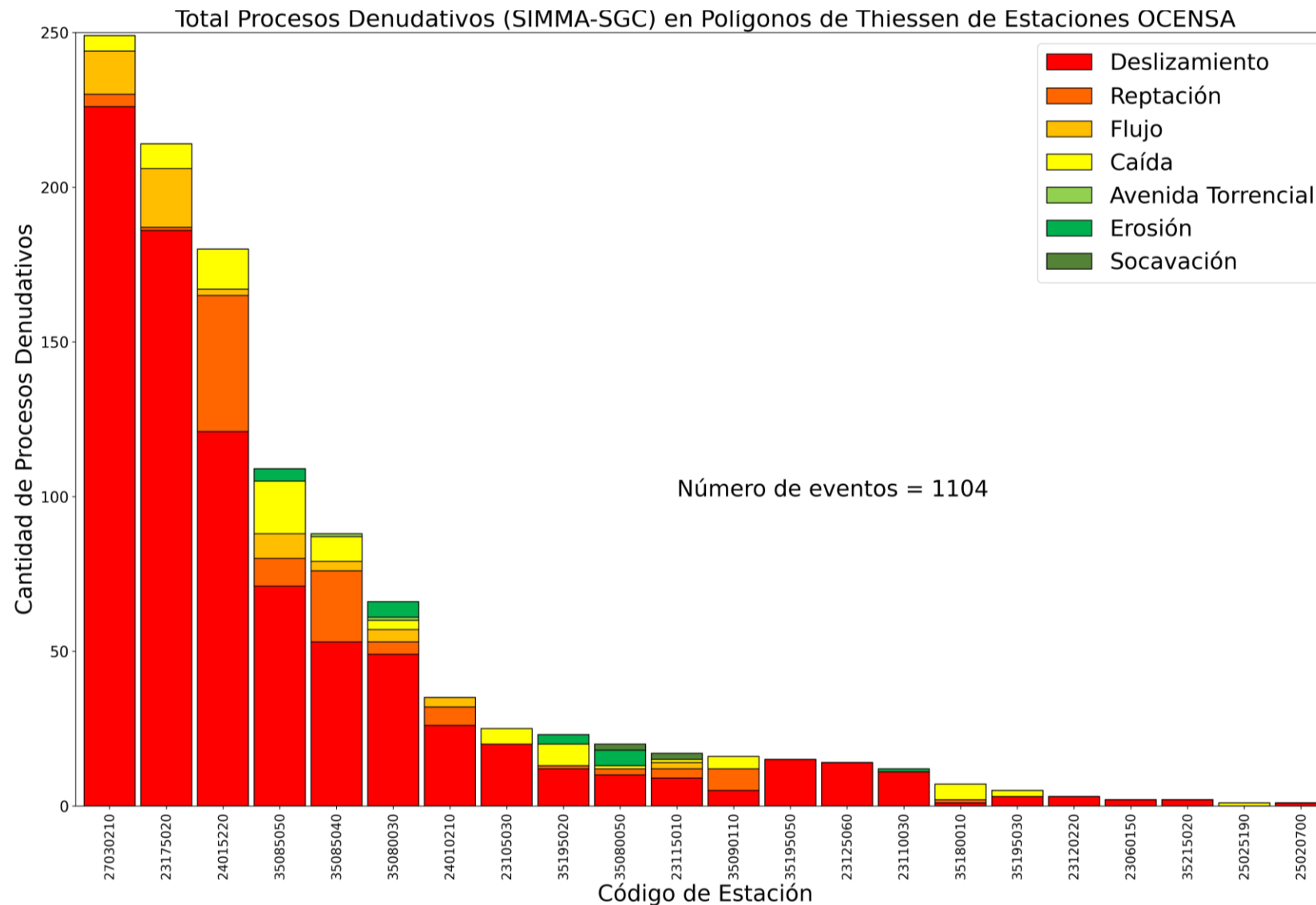
SECTORIZACIÓN SEGÚN ESTACIONES DE OCENSA VS. PROCESOS DENUDATIVOS





Total Procesos Denudativos (SIMMA-SGC) en Polígonos de Thiessen de Estaciones OCENSA

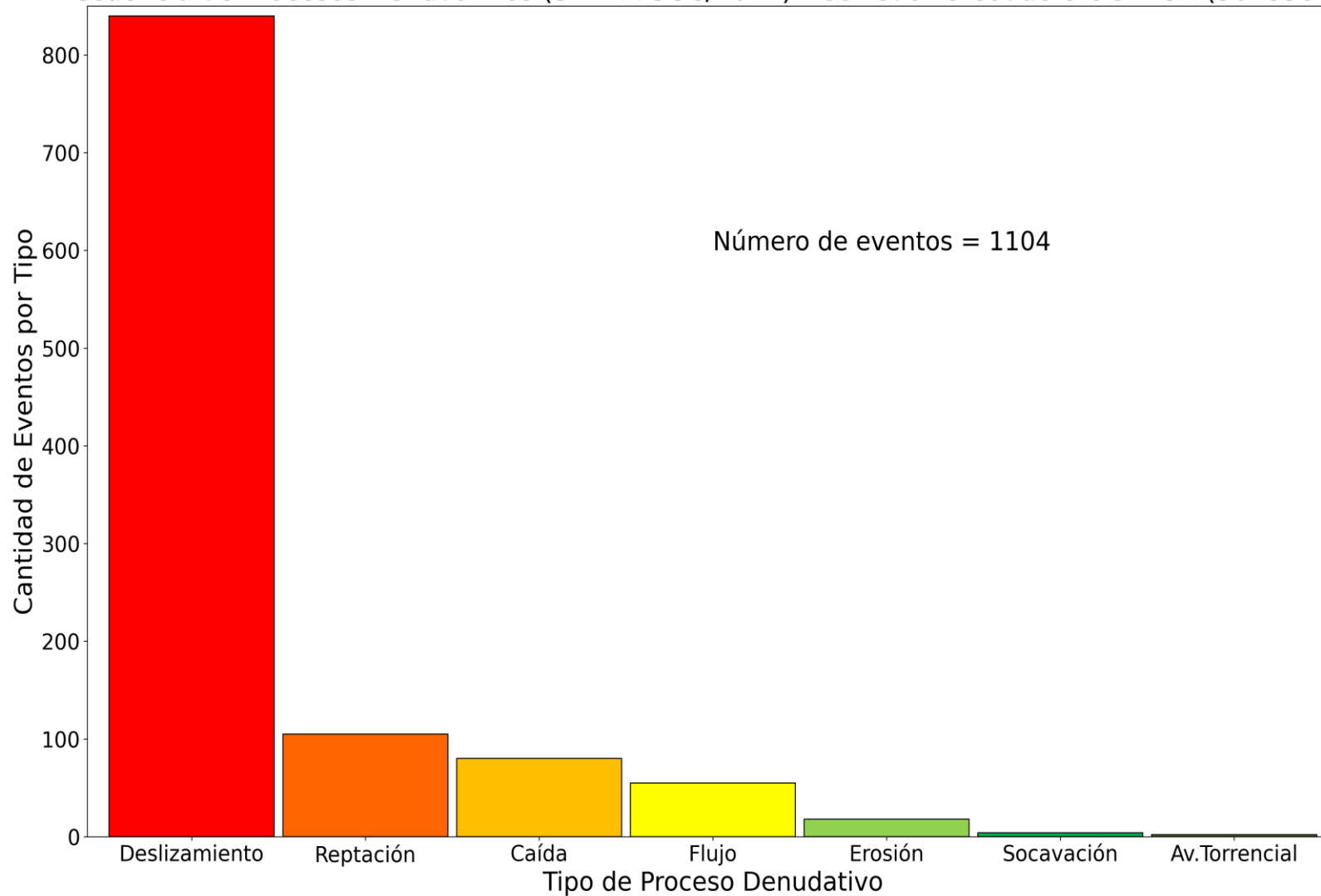




CANTIDAD Y TIPOLOGÍA



Frecuencia de Procesos Denudativos (SIMMA-SGC/2021) - Corredor Oleoducto OCENSA (50x836 km)



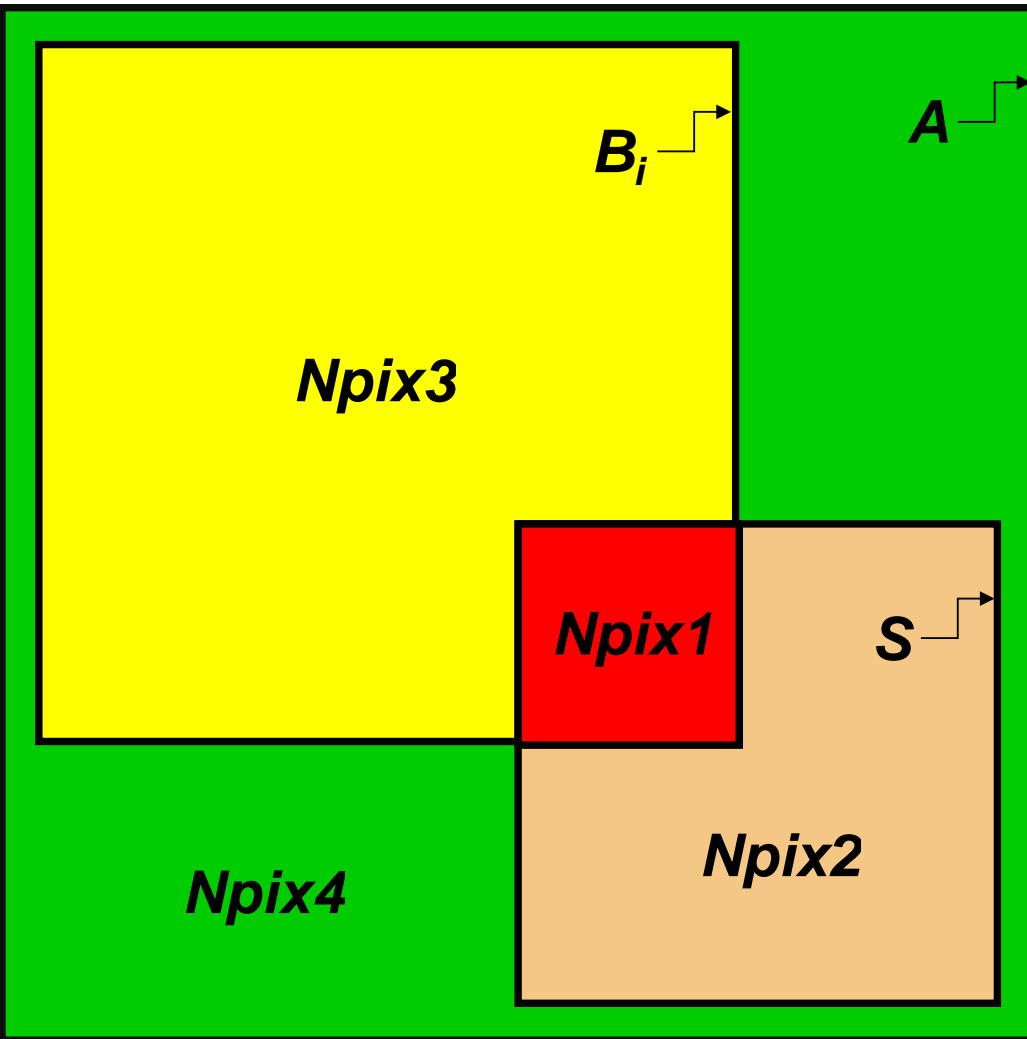
MÉTODO PESOS DE EVIDENCIA



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

MÉTODO PESOS DE EVIDENCIA



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

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

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

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

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

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

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

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

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



MÉTODO PESOS DE EVIDENCIA



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

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

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

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



Interpretación de los pesos de evidencia de factor B de la 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 $W_{B_i}^+ \cong 0$ 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.

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

Modelo Digital de Elevación

(base morfométrica – tipo ráster)

DEM

METADATOS

Fuente	SRTM - NASA
Bandas	1
Resolución	30 metros
Tipo de proyección	Transversa de Mercator
EPGS	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

V_1

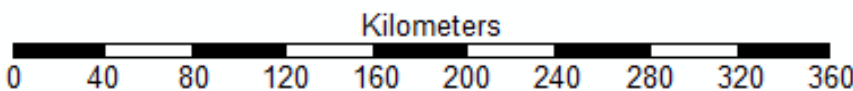
Unidades Geológicas Superficiales

(Variable categórica – tipo polígono)

UGS



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



23 y 24 de N

V_2

Unidades Geomorfológicas

(Variable categórica – tipo polígono)

GMF



Kilometers
0 40 80 120 160 200 240 280 320 360



23 y 24 de N

V_3

Usos y Coberturas del Suelo

(Variable categórica – tipo polígono)

CBT



Kilometers
0 40 80 120 160 200 240 280 320 360

OCENSA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales



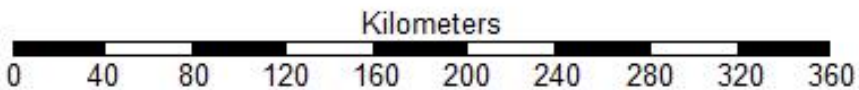
23 y 24 de N

X_1

Acumulación de Flujo

FLA

(variable continua – tipo ráster)



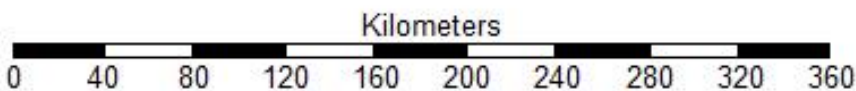
23 y 24 de N

X_2

Longitud de Flujo

(variable continua – tipo ráster)

FLL

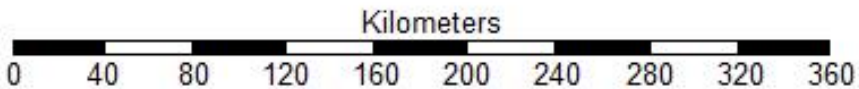


X_3

Curvatura General

(variable continua – tipo ráster)

GNC

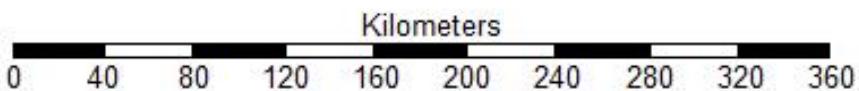


X_4

Curvatura de Plano

(variable continua – tipo ráster)

PLC

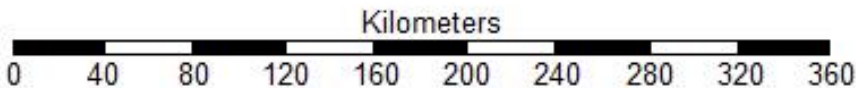


X_5

Curvatura de Perfil

PRC

(variable continua – tipo ráster)



23 y 24 de N

X_6

Pendientes

SLP

(variable continua – tipo ráster)

Kilometers
0 40 80 120 160 200 240 280 320 360

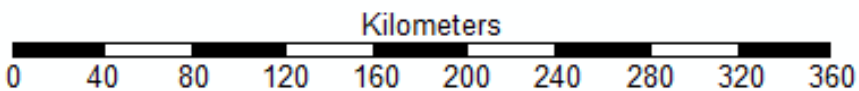
23 y 24 de N

X_7

Índice de Rugosidad del Terreno

(variable continua – tipo ráster)

TRI



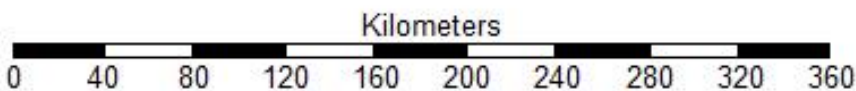
23 y 24 de N

X_8

Índice Topográfico de Humedad

(variable continua – tipo ráster)

TWI



IPG 2023

INTERNATIONAL PIPELINE GEOTECHNICAL CONFERENCE

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



Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales





PREPROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

MM

Inventario de Movimientos en Masa

(Variable booleana – tipo polígono)

MMA

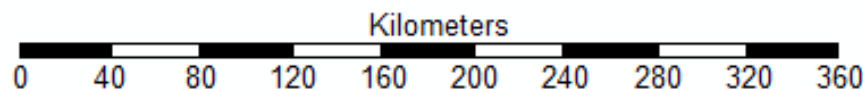


INVENTARIO SELECCIONADO

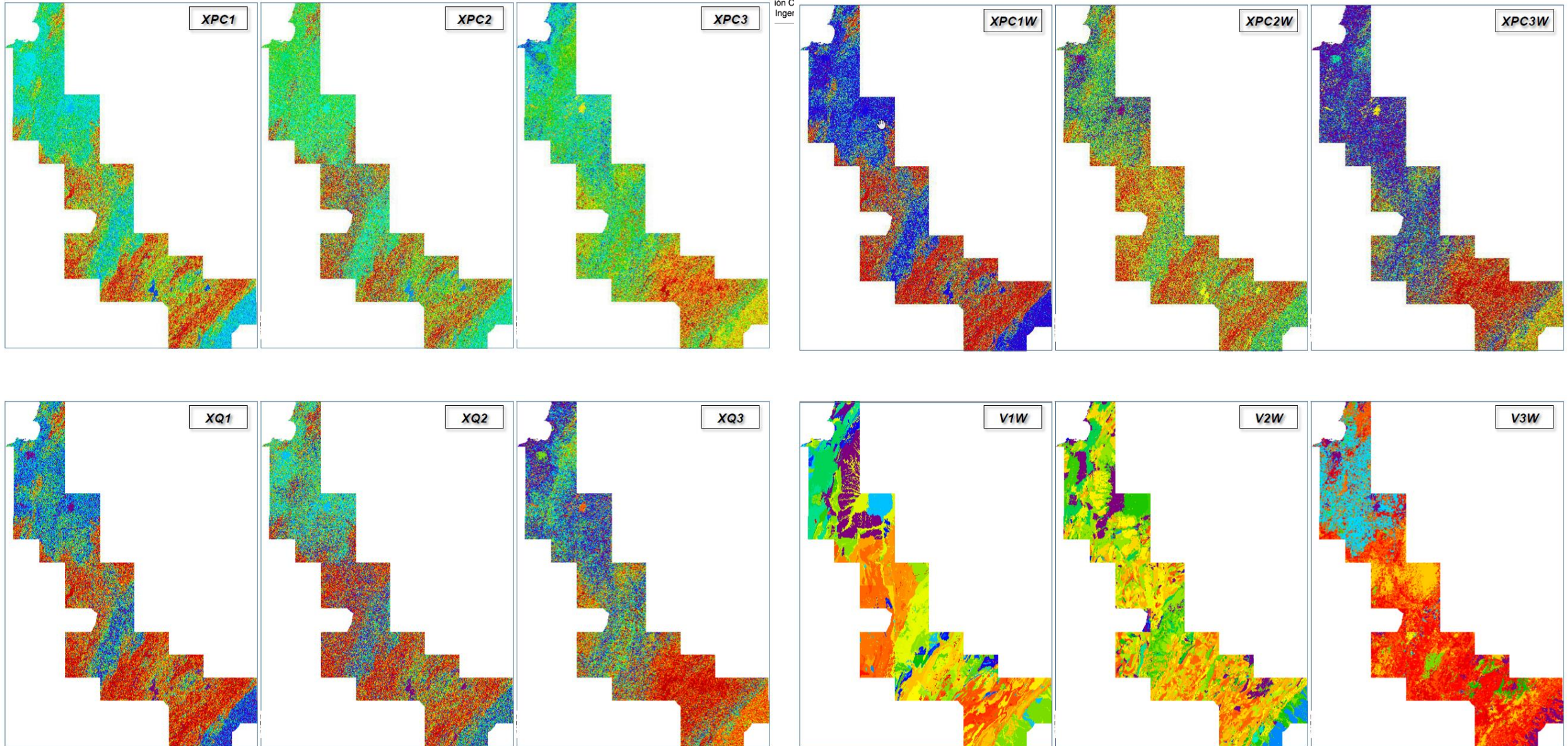
Fuente	Servicio Geológico Colombiano - SGC
Base de datos 1	Inventario Nacional de MM 2021 (6826 datos)
Base de datos 2	SIMMA 2021 (7200, la mayoría en INMM)
Base de datos 3	Ocensa (A.O., 2021)

REGISTROS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

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



PROCESAMIENTO DE VARIABLES



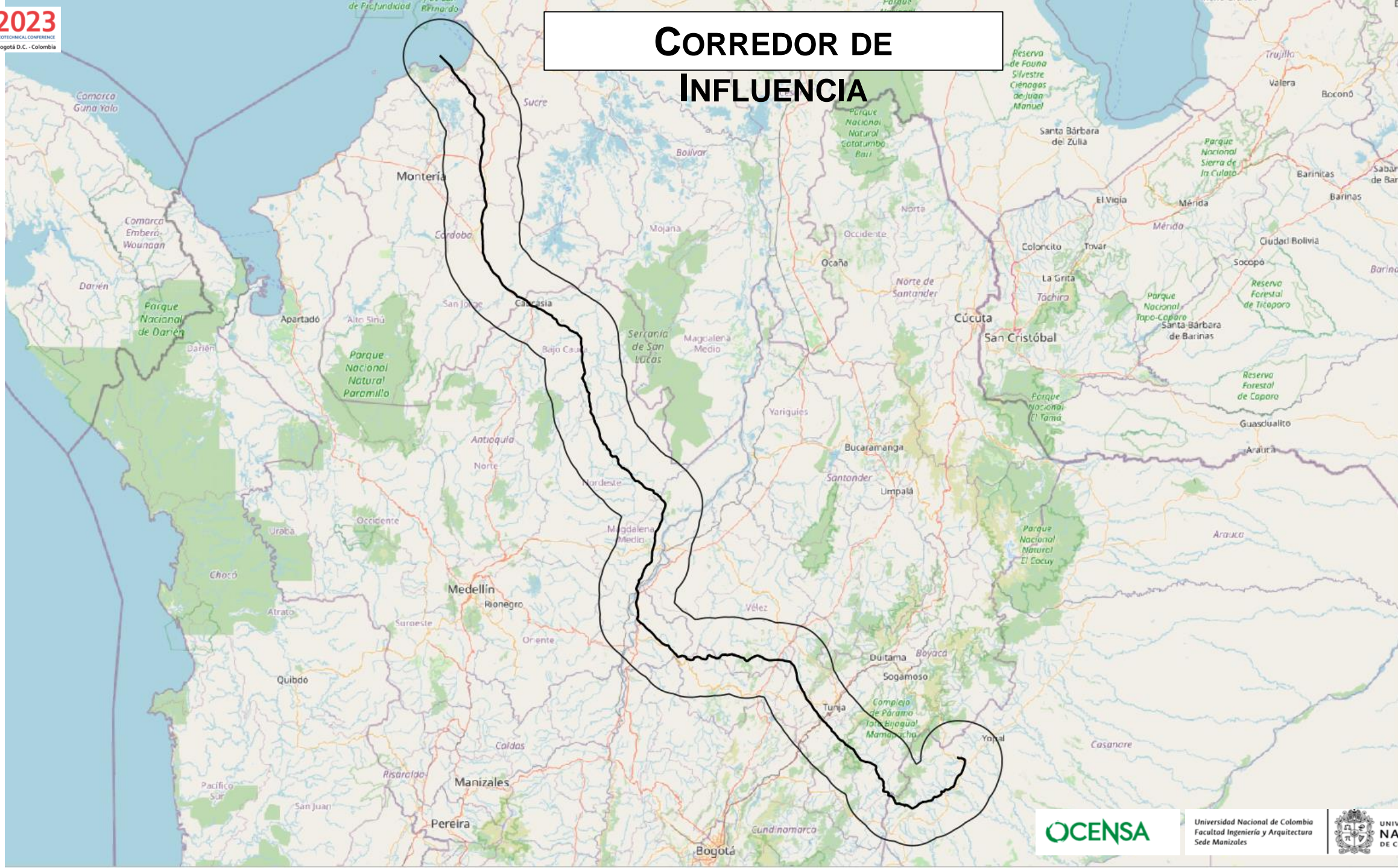
CONTEXTO GEOGRÁFICO GENERAL



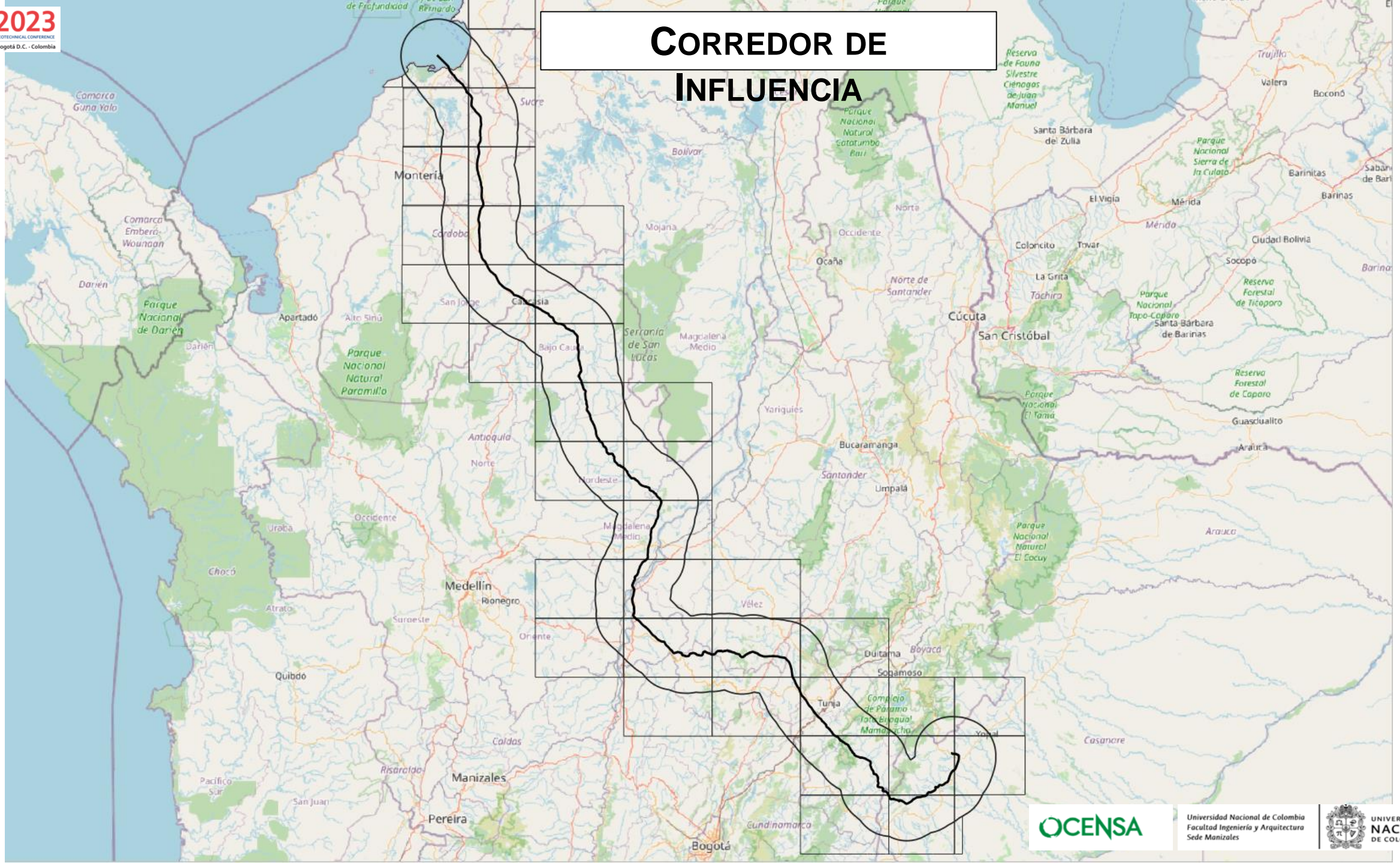
LOCALIZACIÓN OLEODUCTO



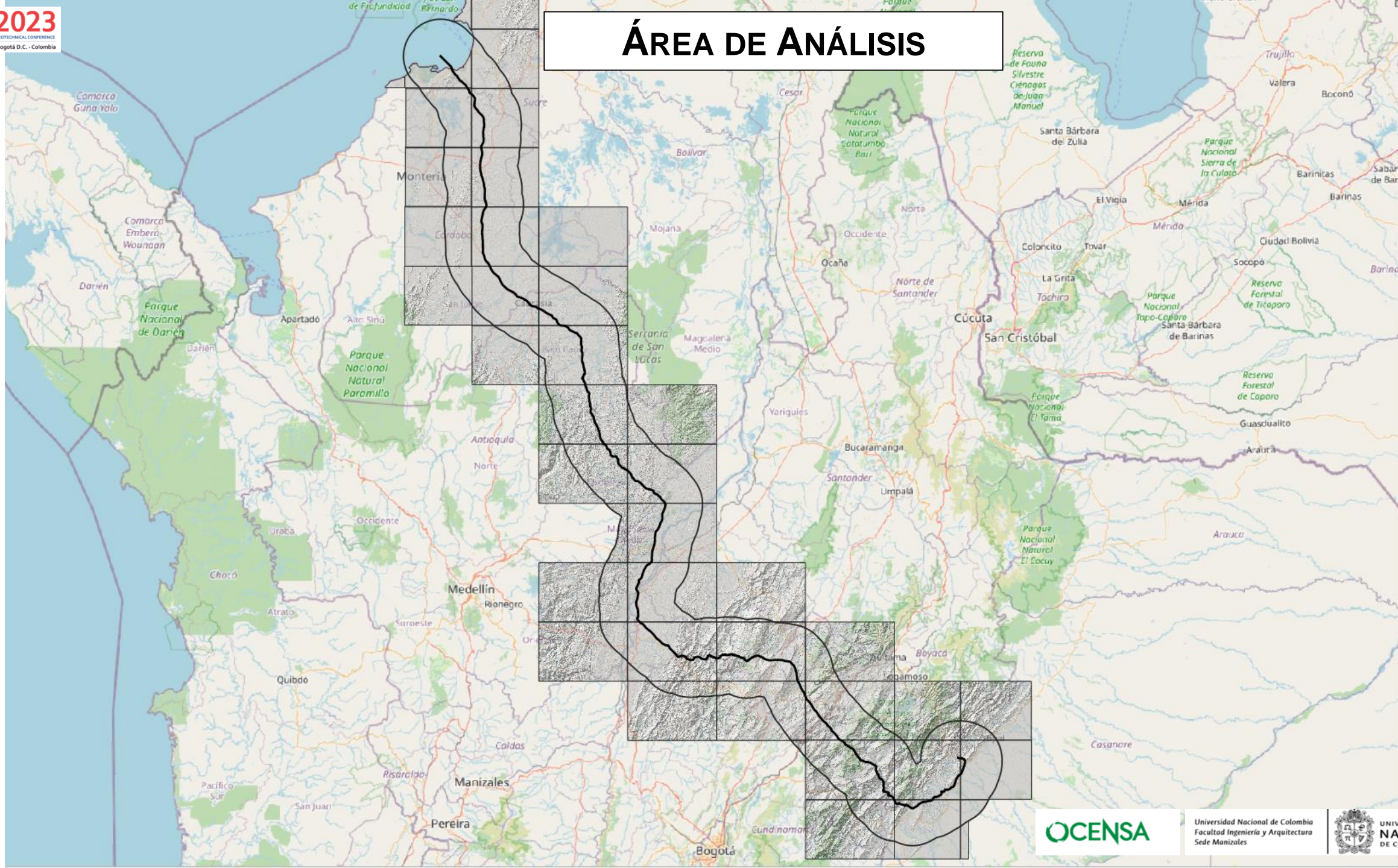
CORREDOR DE



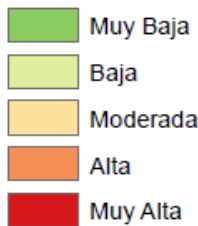
CORREDOR DE INFLUENCIA



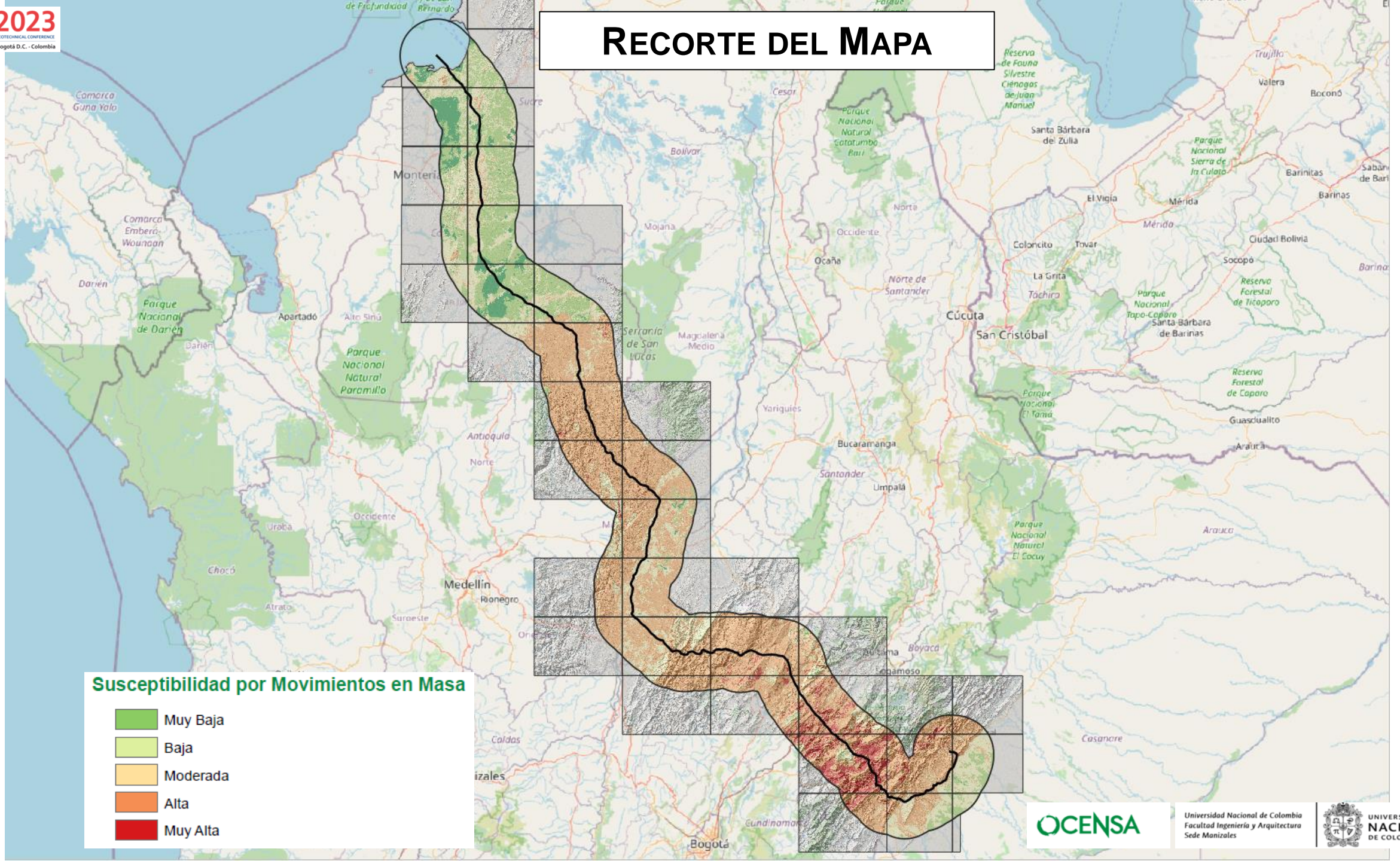
ÁREA DE ANÁLISIS



MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD

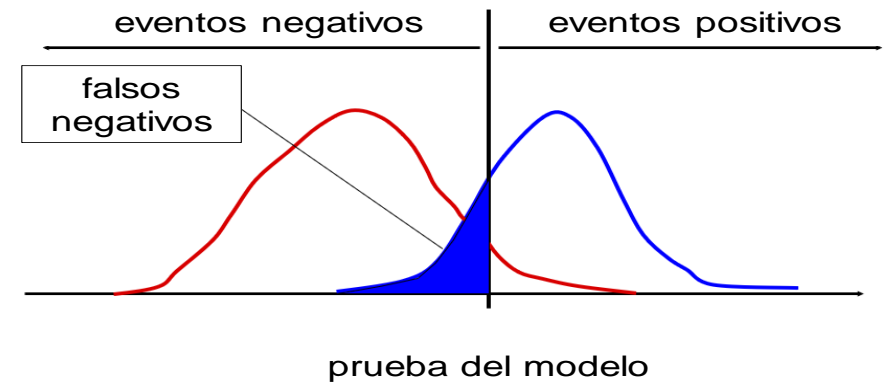
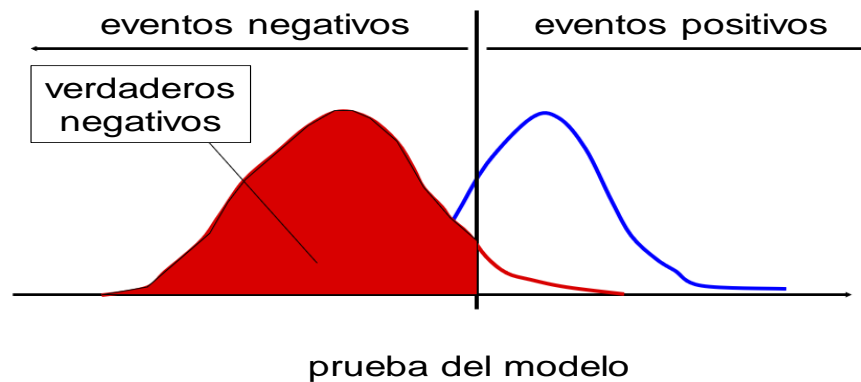
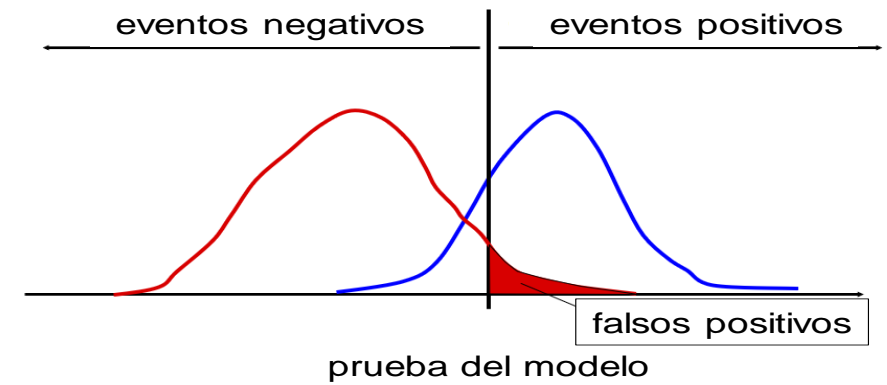
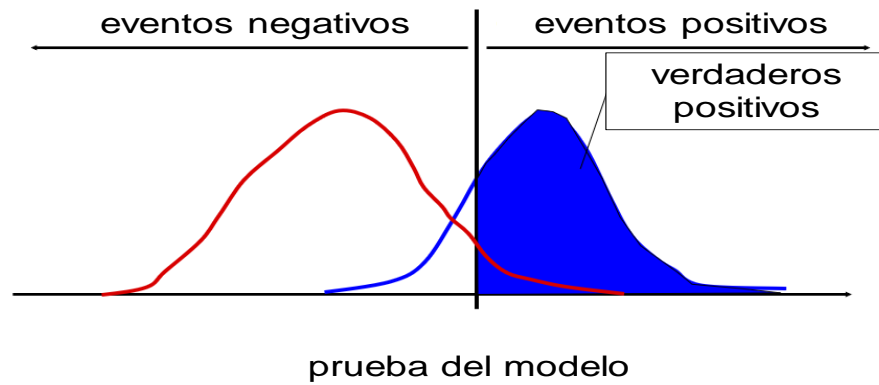
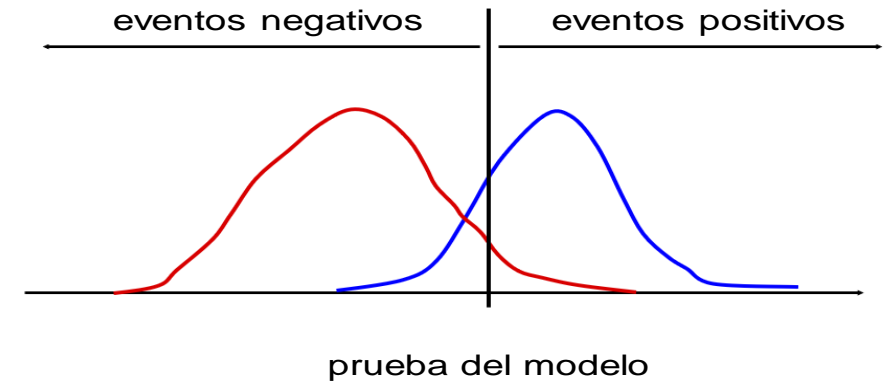
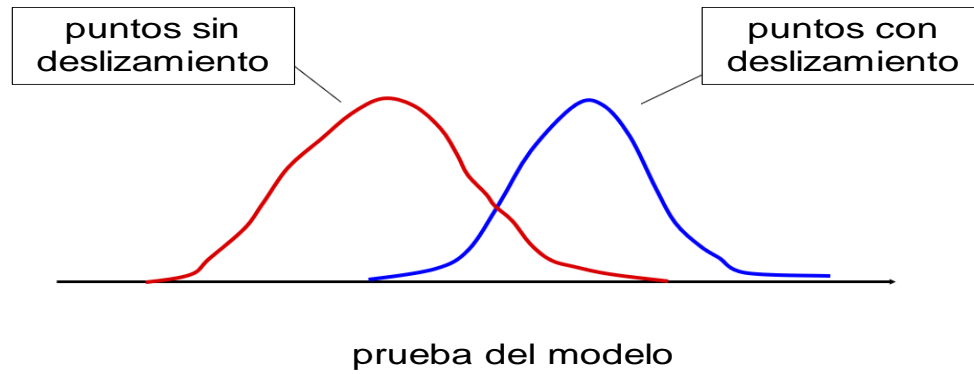


RECORTE DEL MAPA

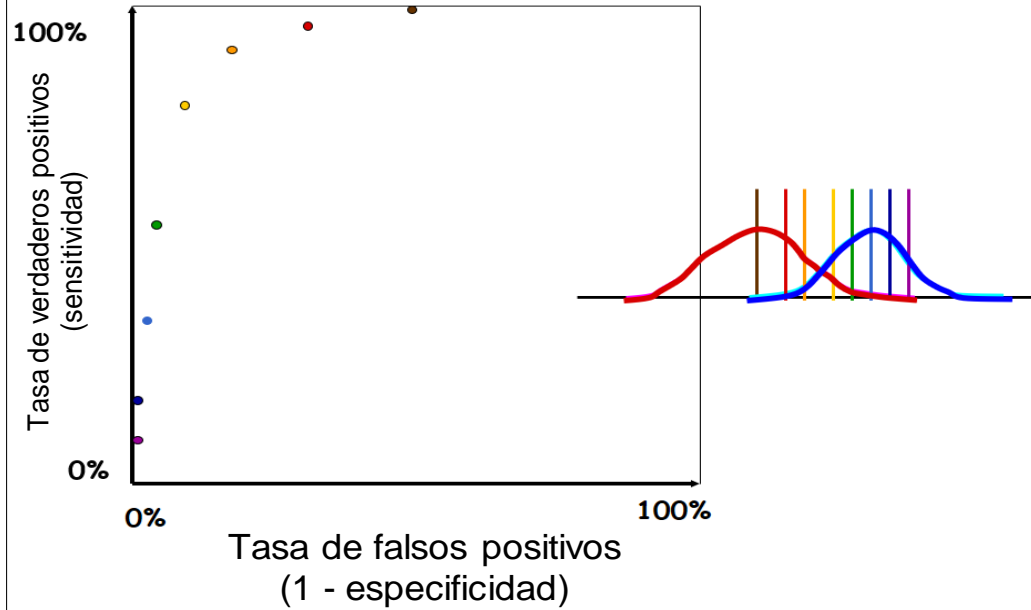




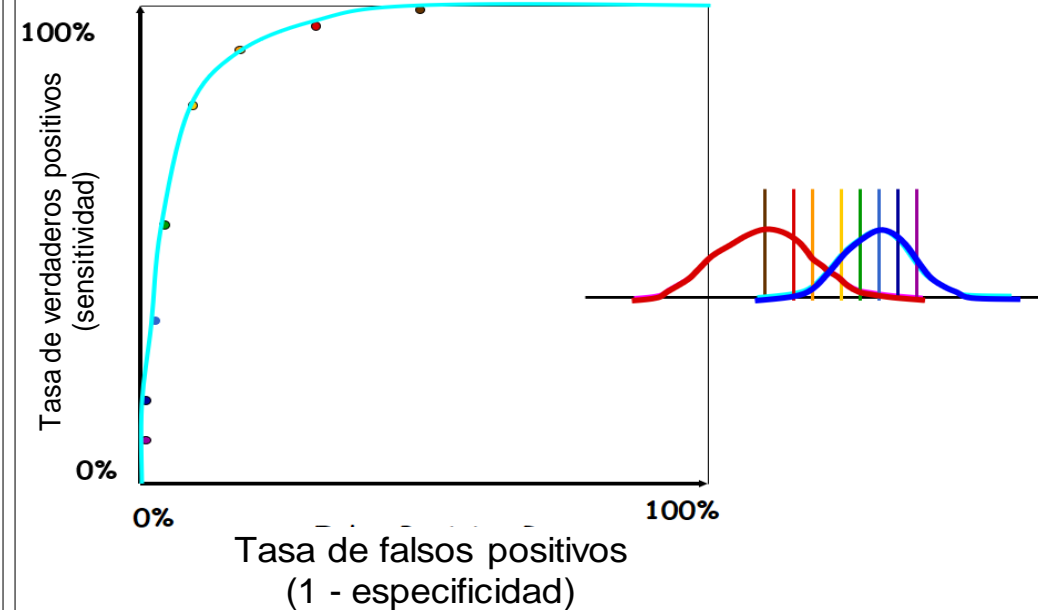
Prueba modelo Evento real	Pronóstico de NO deslizamiento	Pronóstico de deslizamiento
No deslizamiento ($q = 1 - p = 0.0$)	ESPECIFICIDAD: Verdaderos negativos $1 - \alpha$	ERROR TIPO I: Falsos positivos α
Deslizamiento ($p = 1.0$)	ERROR TIPO II: Falsos negativos β	SENSITIVIDAD: Verdaderos positivos $1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



Curvas ROC

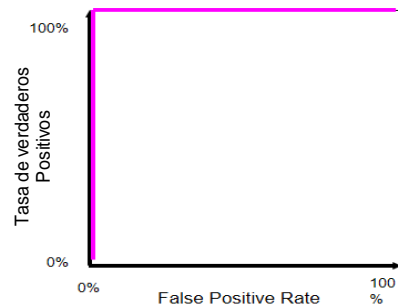


Curvas ROC

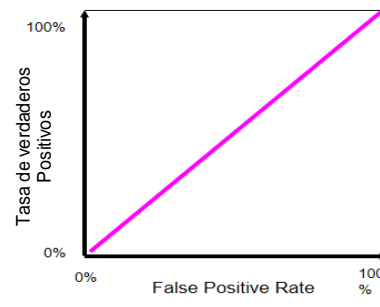


Curvas ROC Extremas

modelo perfecto



modelo inútil

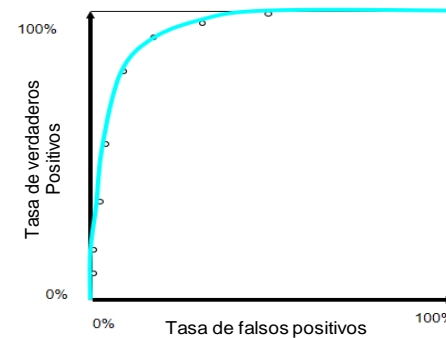


Distribuciones sin ningún traslape

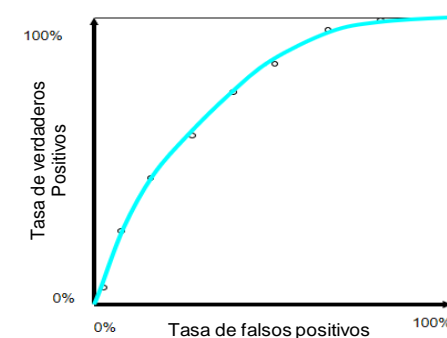
Distribuciones con tralape completo

Comparación de Curvas ROC

mejor modelo

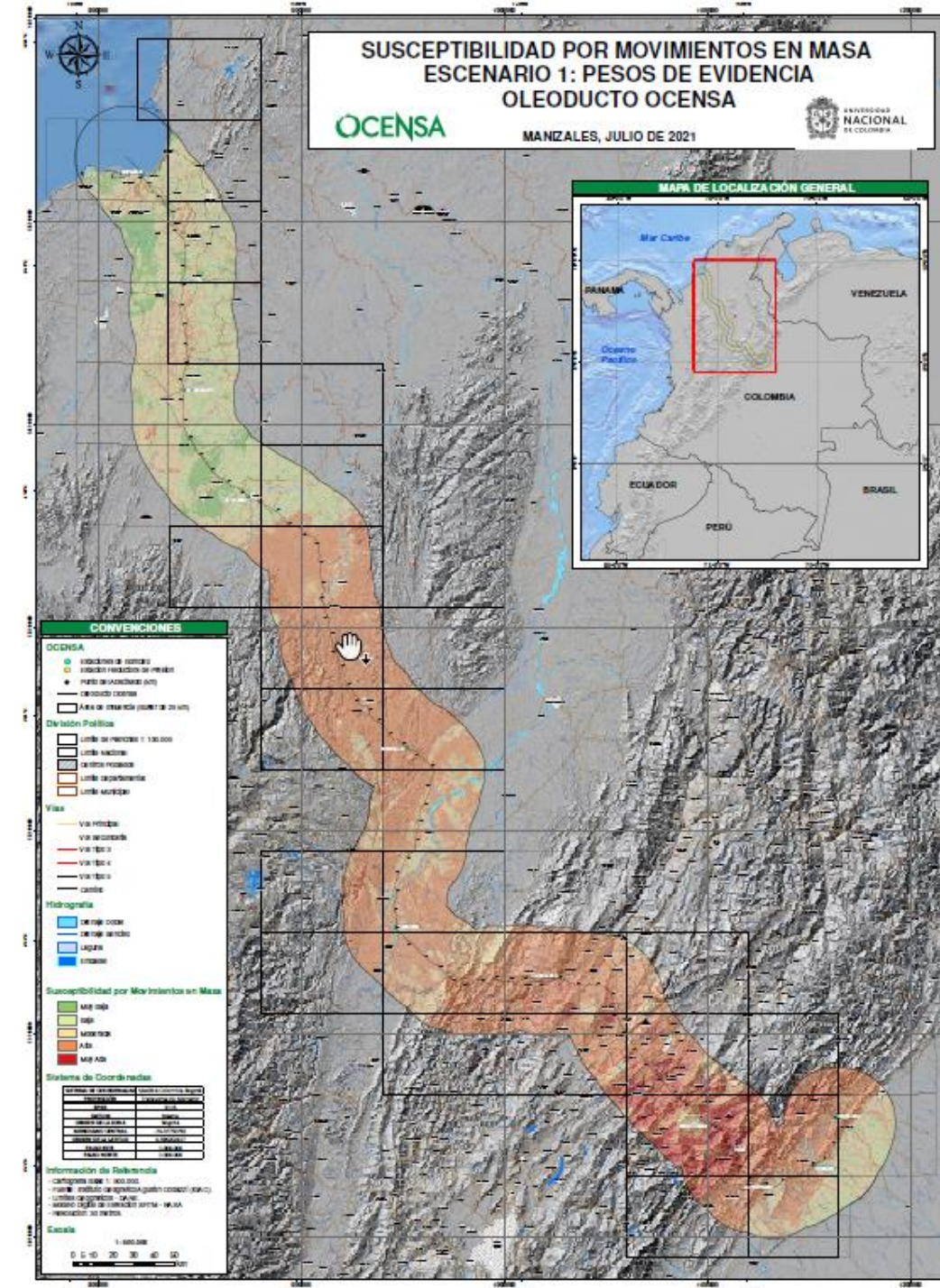
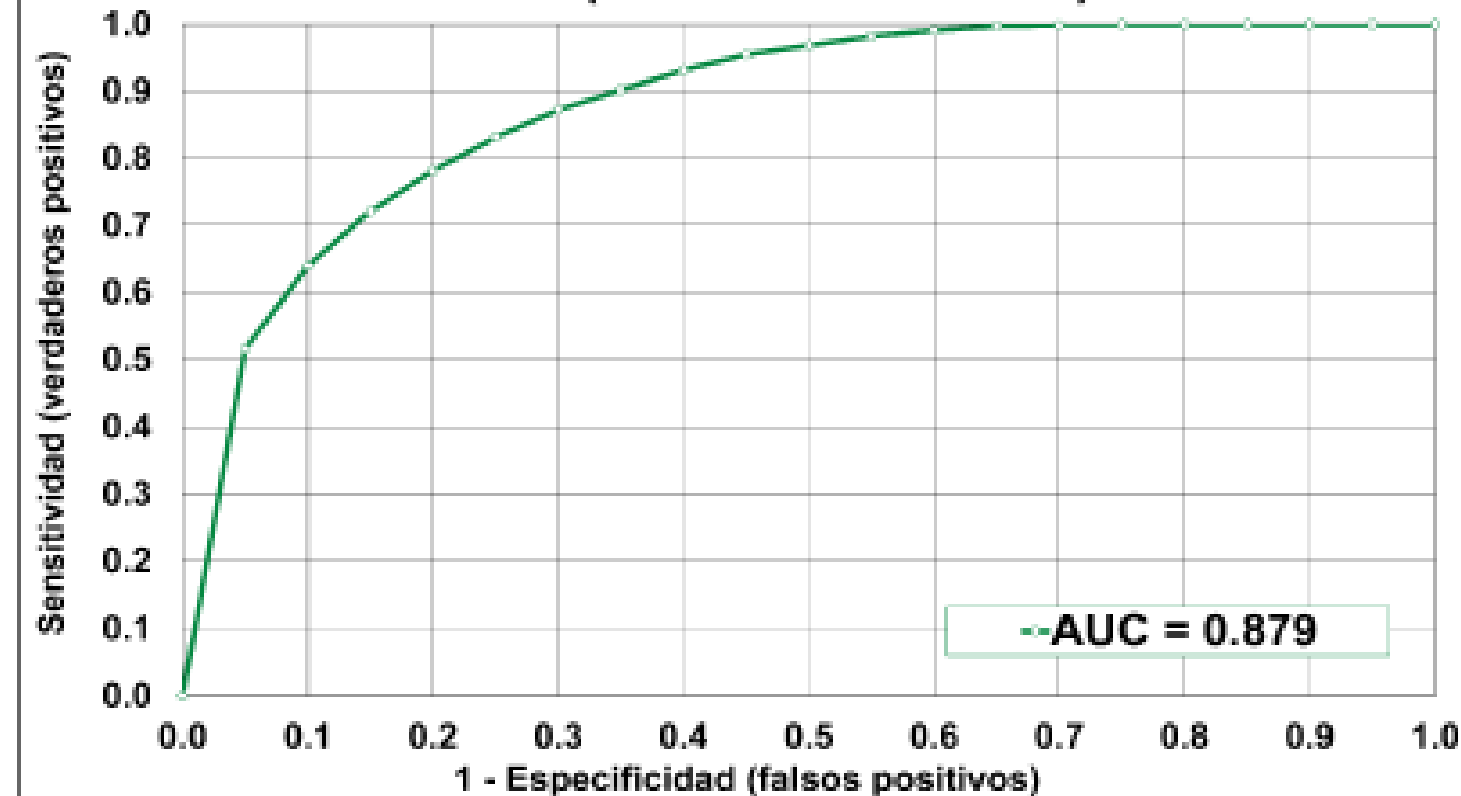


peor modelo



Curva ROC

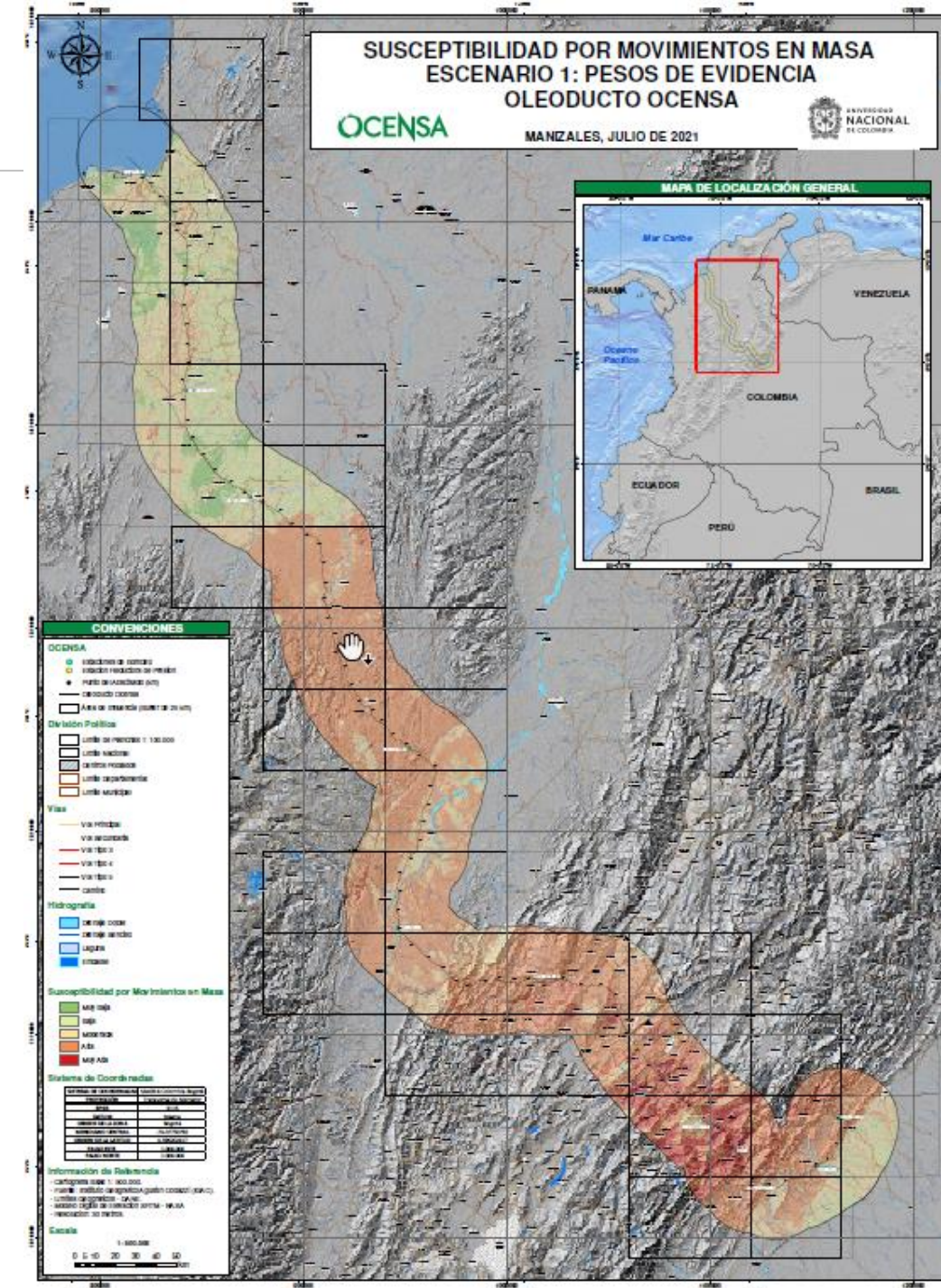
Curva ROC (Pesos de Evidencia)



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:	

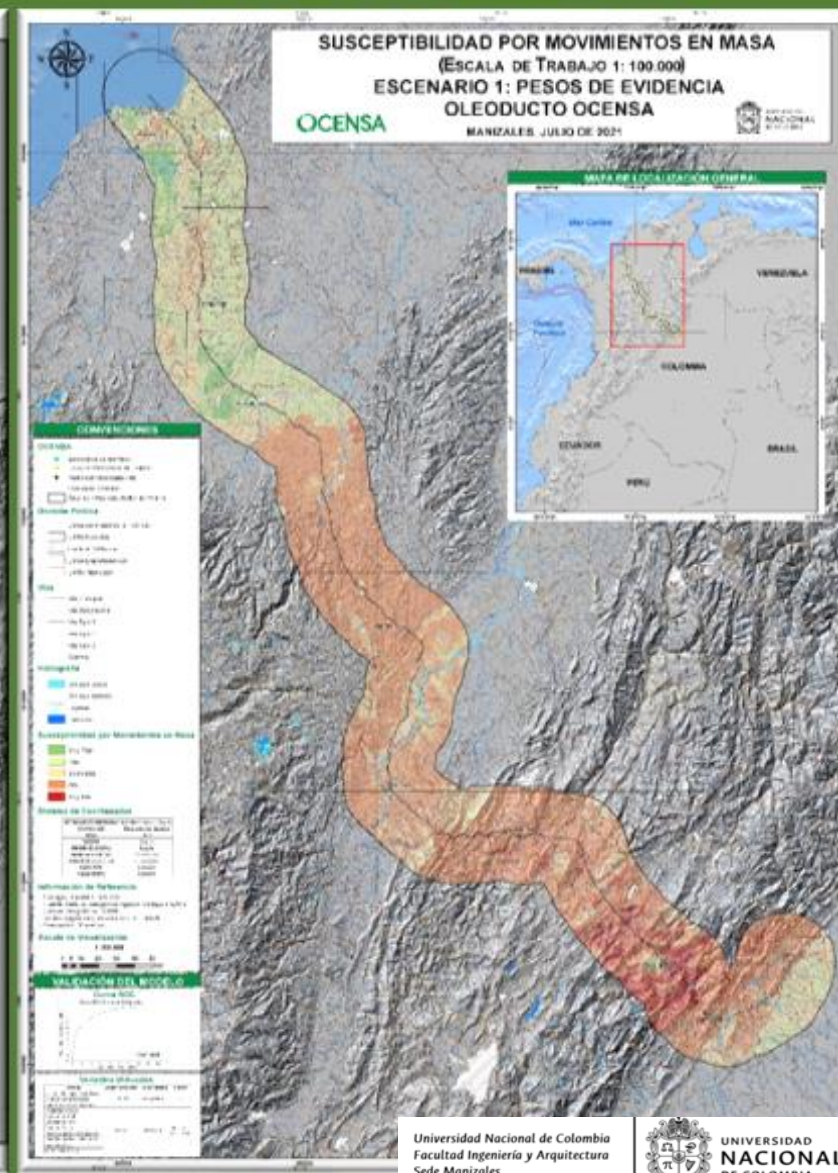
Unidades Geológicas Superficiales, [Unidades Geomorfológicas](#), Coberturas de la Tierra y Uso del Suelo, [Pendientes](#), Curvatura de Plano, [Curvatura de Perfil](#), Curvatura General, [Longitud de Flujo](#), Acumulación de Flujo, [Índice Topográfico de Humedad](#), Índice de Rugosidad del Terreno,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





Clase de Susceptibilidad	Área de Análisis			Área de Estudio (buffer de 25 km)		
	# de Píxeles	(km²)	(%)	# de Píxeles	(km²)	(%)
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		

UNAL FIA 2021 WoE

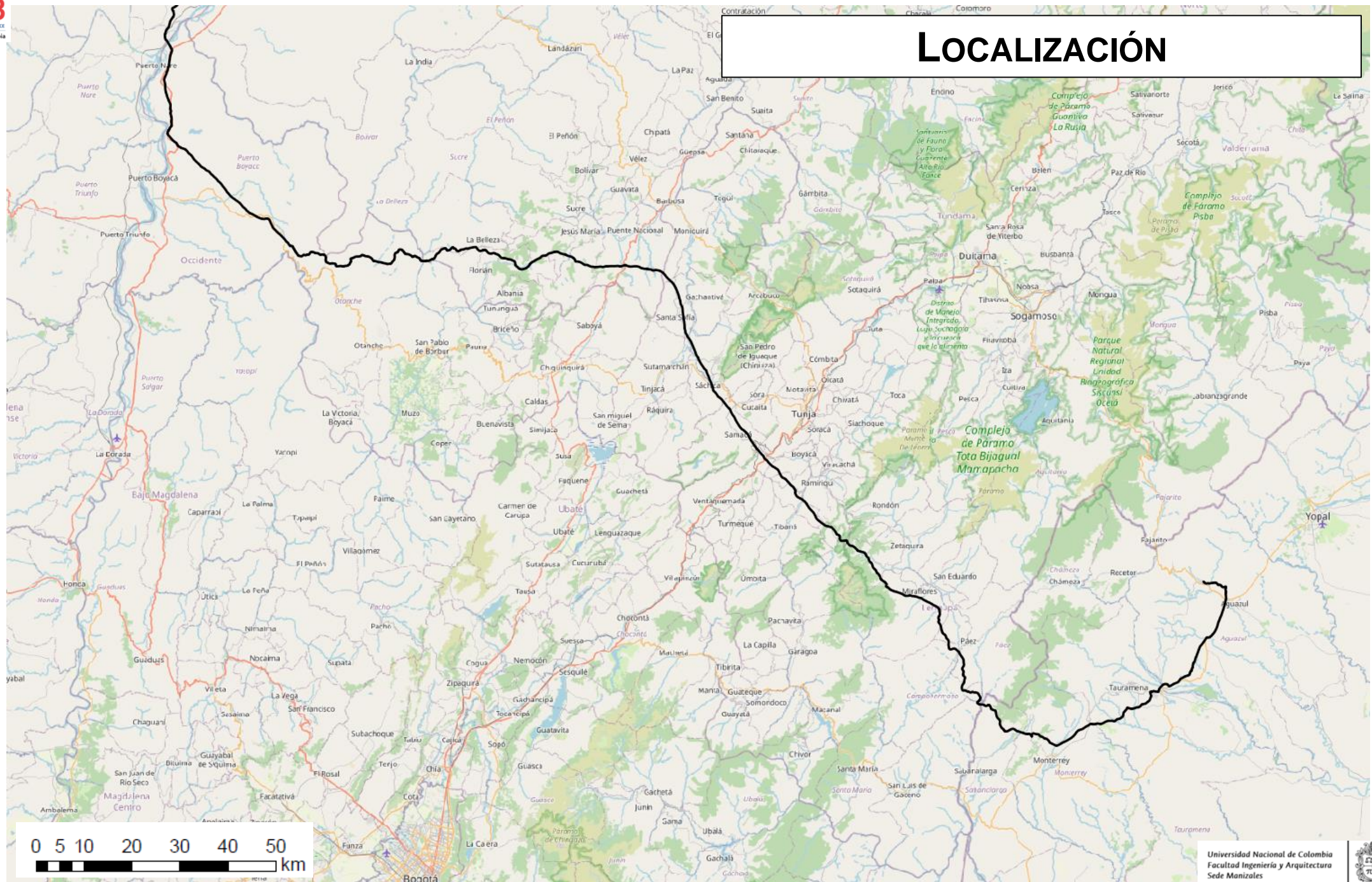


CONTEXTO GEOGRÁFICO REGIONAL

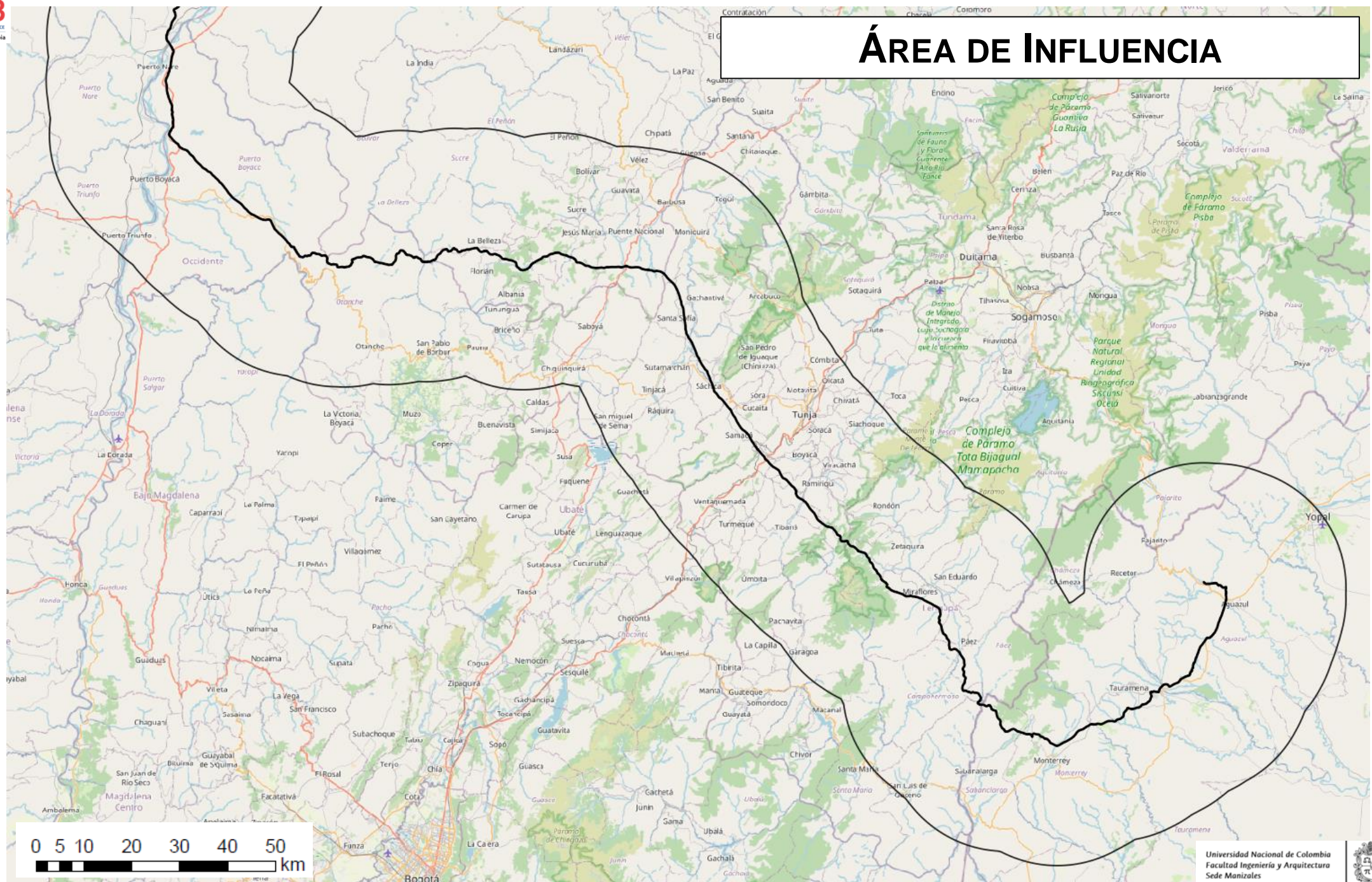


0 5 10 20 30 40 50
km

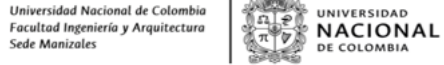
LOCALIZACIÓN



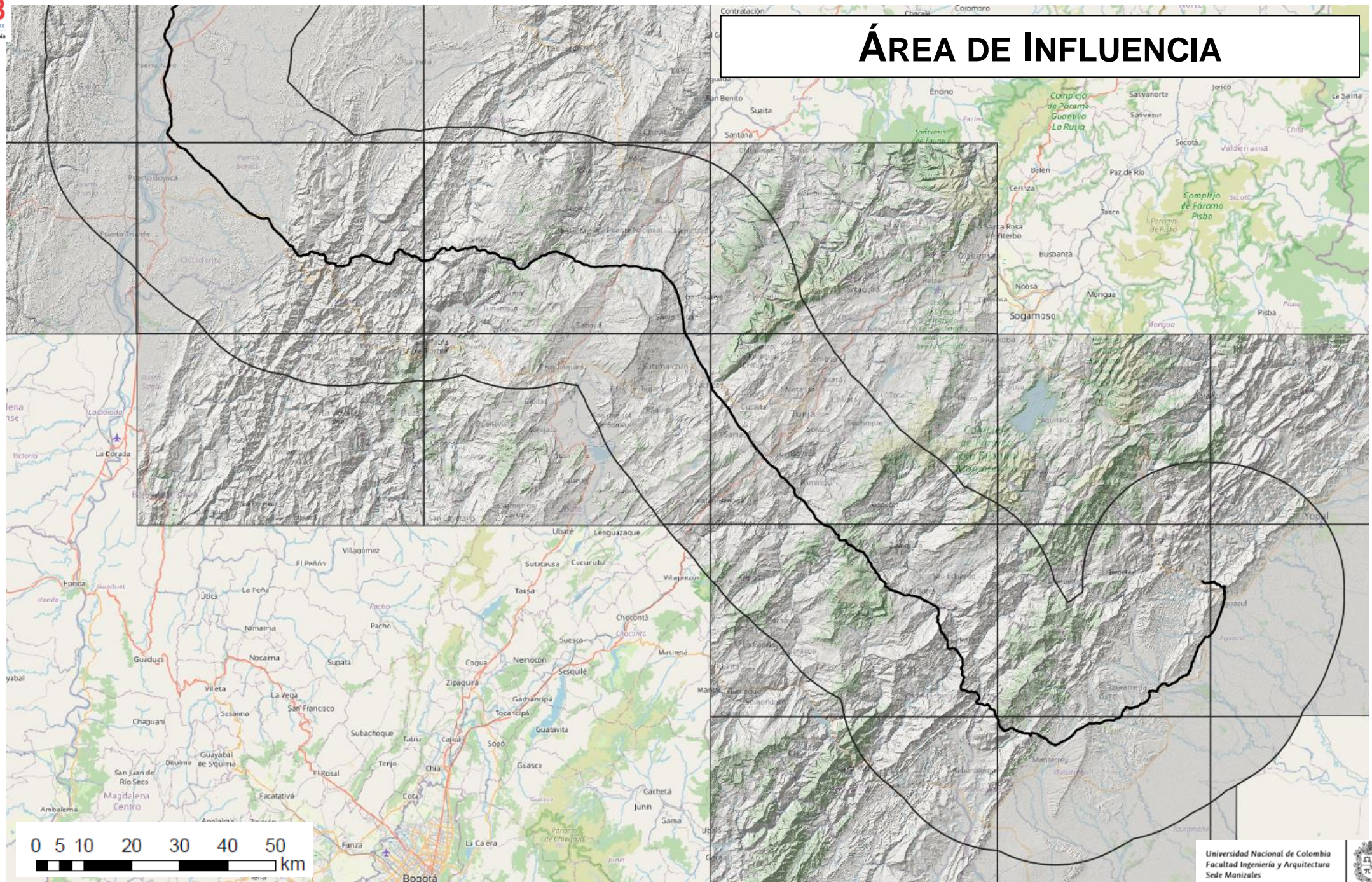
ÁREA DE INFLUENCIA



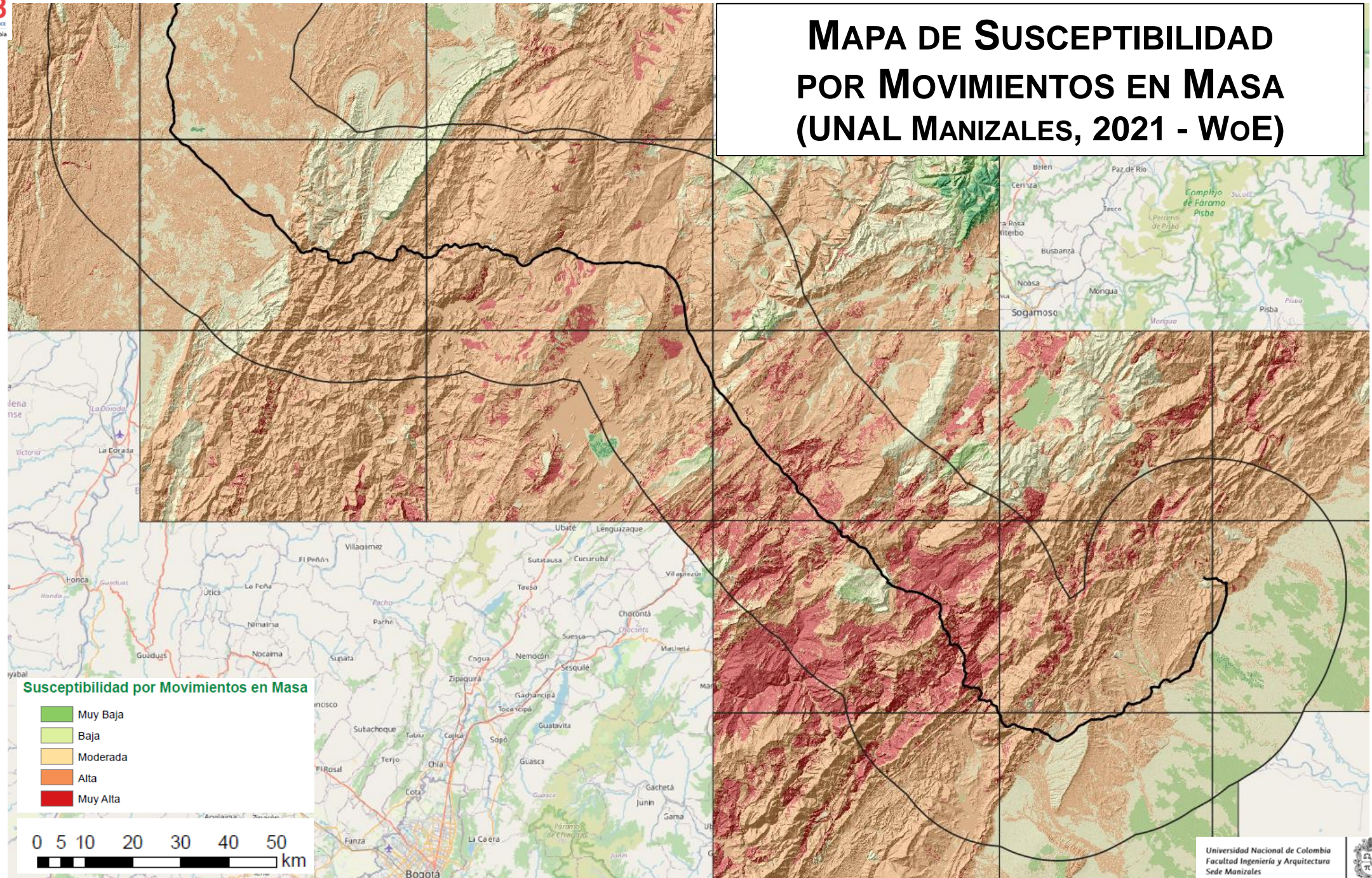
ÁREA DE INFLUENCIA



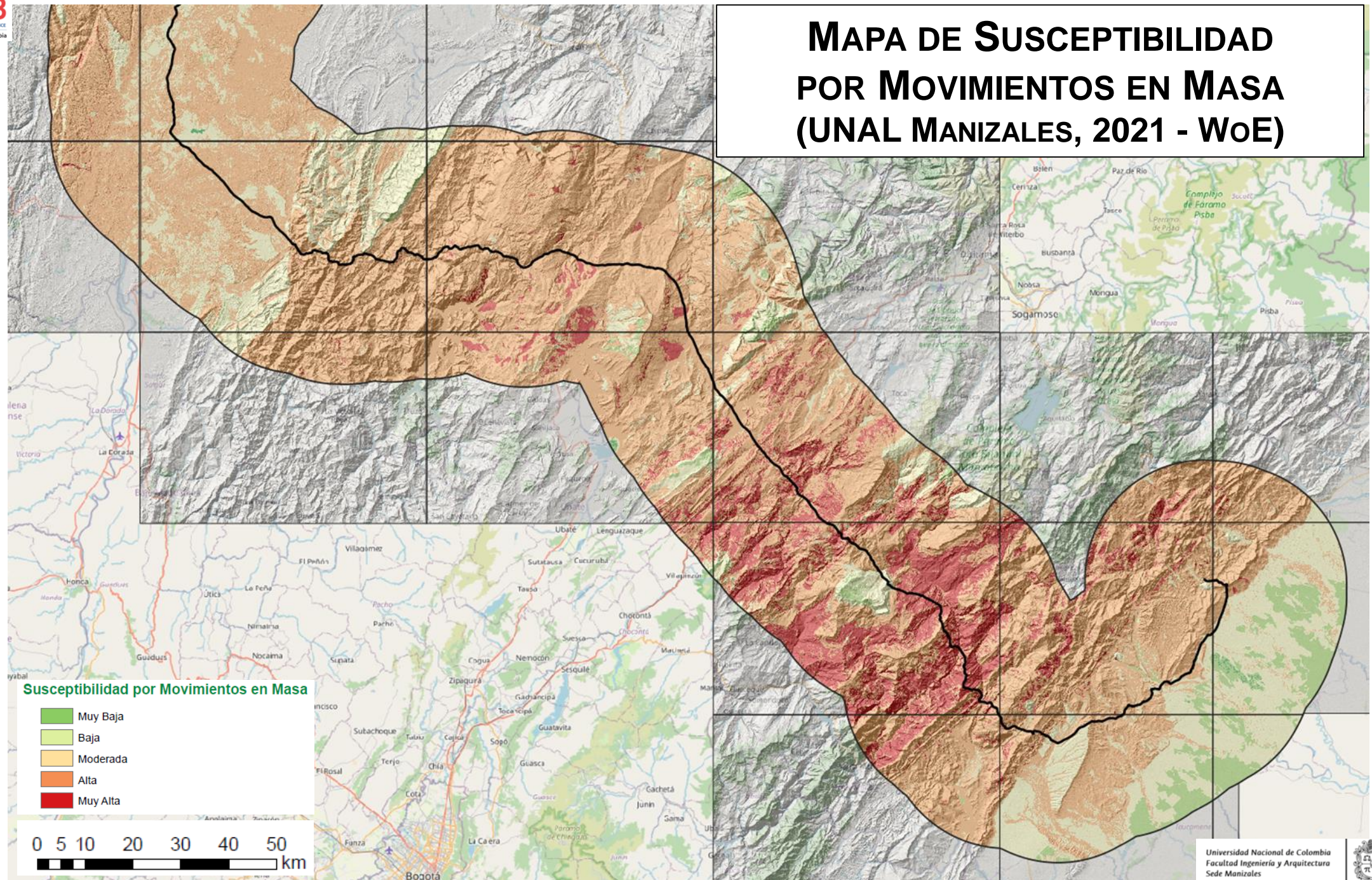
ÁREA DE INFLUENCIA



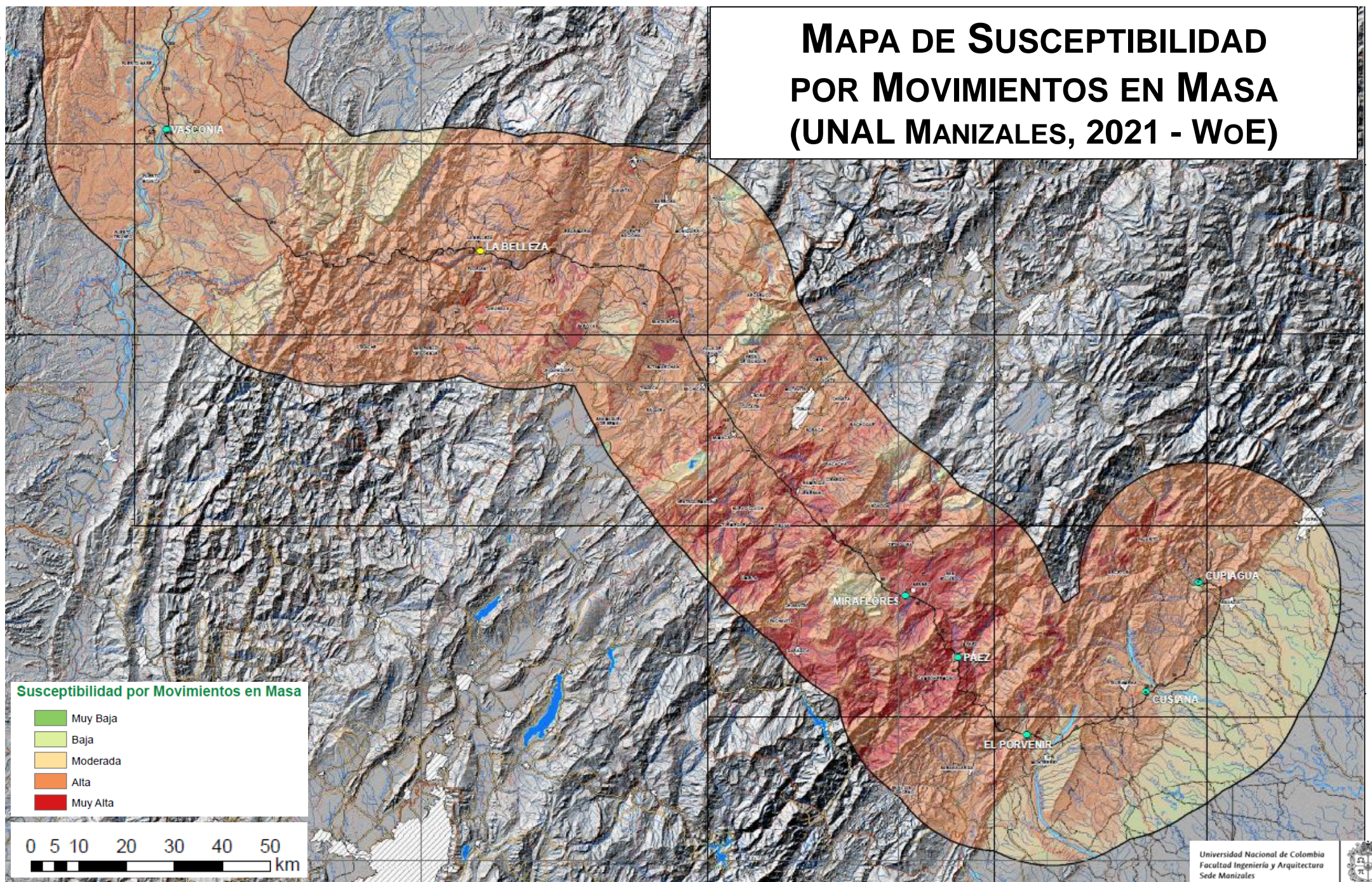
MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA (UNAL MANIZALES, 2021 - WoE)



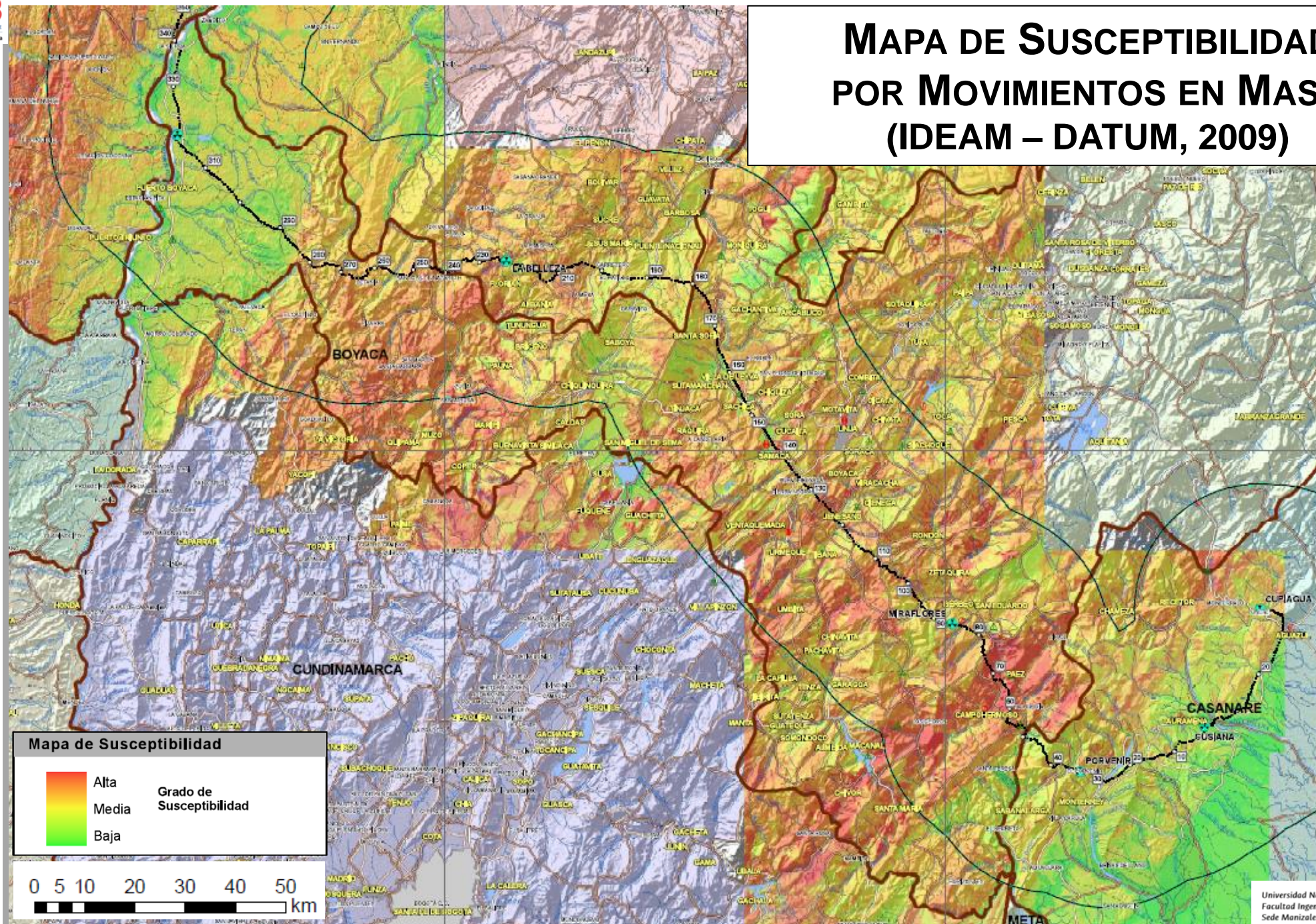
MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA (UNAL MANIZALES, 2021 - WoE)



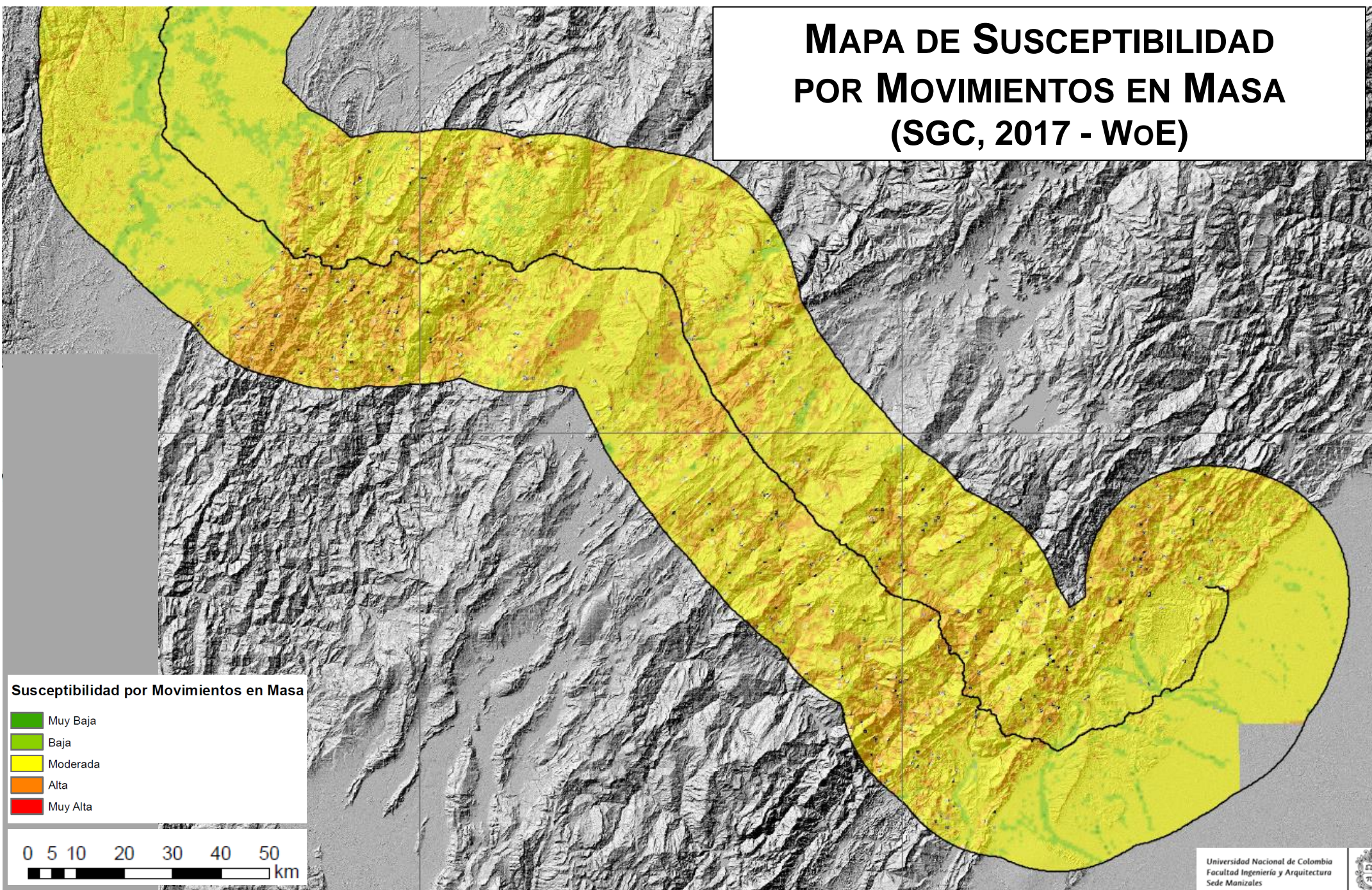
MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA (UNAL MANIZALES, 2021 - WoE)



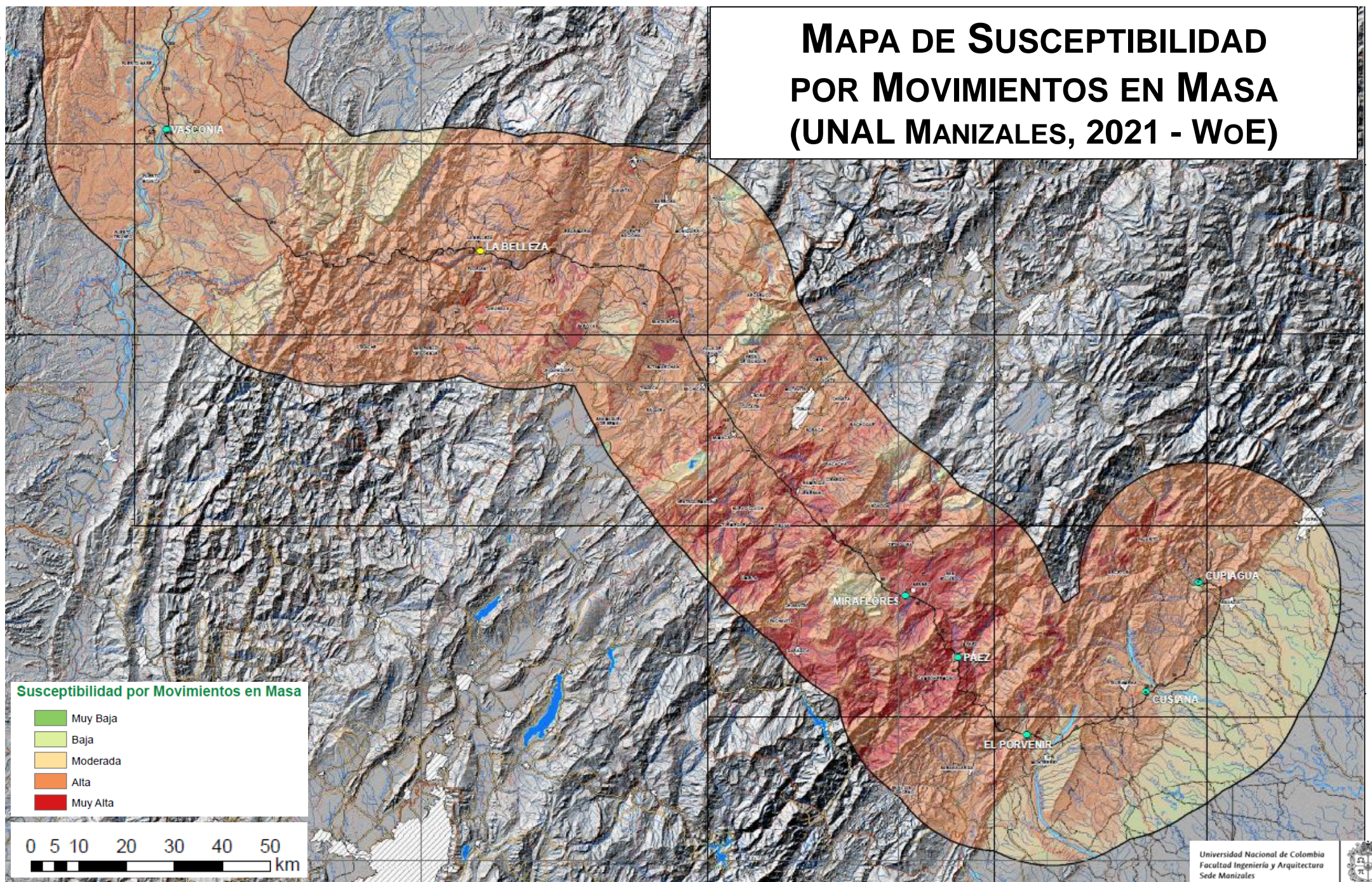
MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA (IDEAM – DATUM, 2009)



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



MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA (UNAL MANIZALES, 2021 - WoE)

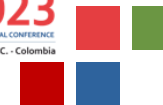


SITIOS DE INTERÉS GEOTÉCNICO

Sector El Porvenir

IPG 2023

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



Cruce Quebrada
La Piñalera
PK35+500

Sector El Porvenir

Convenciones

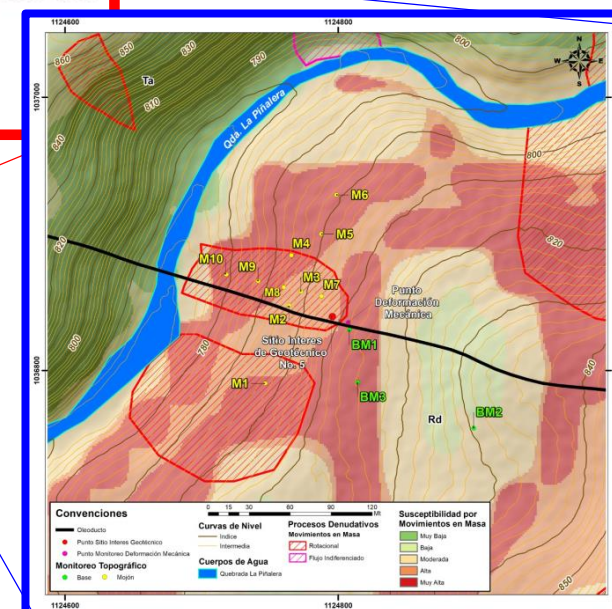
- Oleoducto
- Sitios de Interés Geotécnico
- 🏠 Estaciones Bombeo

OCENSA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA



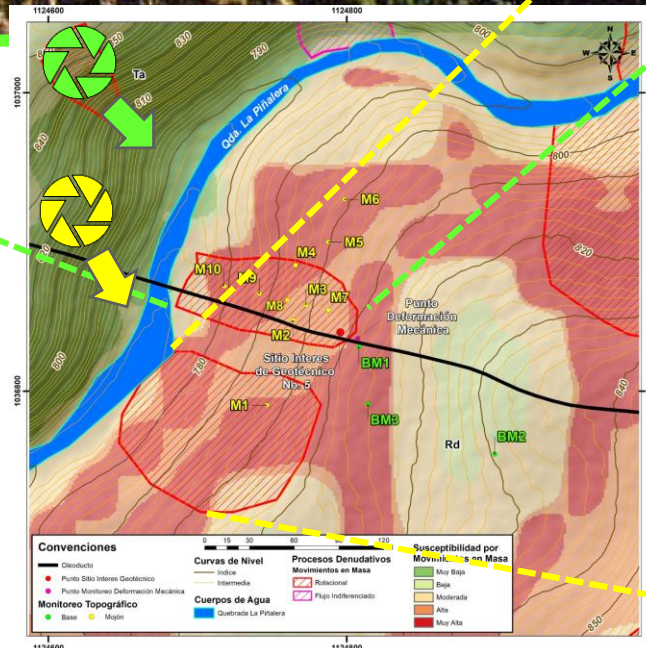
SECTOR DE LA PIÑALERA (PK 35.500)

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

OLEODUCTO CENTRAL DE COLOMBIA S.A., OCENSA
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.

NOTA: Resultados de aplicar otros métodos (regresión logística y OCENSA)



**Muchas gracias
por su
atención!!!**

