

Introducción

El proyecto SIATA del Área Metropolitana ha estado monitoreando en tiempo real el movimiento en masa en la vereda Ancón II de Copacabana desde mayo de 2019. El esquema de monitoreo para el sitio, incluyó la instalación de sensores superficiales y en profundidad, además de campañas periódicas de sobrevuelos con dron. La ubicación de los sensores en tierra dentro de la zona de afectación se muestra en la Figura 1. Adicionalmente, en la Tabla 1 se muestra el resumen de estos, el periodo de actividad dentro del monitoreo y la resolución temporal de cada uno. Es importante mencionar que a partir del mes de mayo el movimiento en masa se ha venido analizando a través de imágenes satelitales mediante metodología InSAR.

Estación	Tipo sensor	Inicio monitoreo	Finalización monitoreo	Resolución temporal
374	Acelerómetro	2019-05-06	2019-06-17	1 dato por minuto
372	Extensómetro	2019-05-03	2019-06-17	1 dato por minuto
379	Acelerómetro	2019-06-05	Actualidad	1 dato por minuto
385	Extensómetro	2019-07-11	2021-07-08	1 dato por minuto
436	Humedad	2020-04-05	2021-06-20	1 dato por minuto
375	GNSS	2019-05-07	2019-06-17	1 dato por minuto
386	GNSS	2019-07-11	2021-11-25	1 dato por minuto
373	Pluviómetro	2019-05-03	Actualidad	1 dato por minuto
100269	TDR	2019-09-16	Actualidad	1 trama cada 10 minutos
100302	Cámara	2020-08-10	2021-11-25	1 imagen cada 5 minutos

Tabla 1. Sensores instalados para el monitoreo en tiempo real del movimiento en masa de Ancón 2 - Copacabana. (Trama: unidad de medida de datos, paquete de datos, en este caso 3000 u 8000 según el cable que se consulte).



Figura 1. Configuración del esquema de monitoreo en la zona de afectación del movimiento en masa de la vereda Ancón II (Copacabana).

Monitoreo geotécnico mediante sensores en tierra

A continuación, se presenta un análisis detallado de las series históricas registradas por los sensores instalados en el sitio durante su periodo de actividad y una descripción sencilla de su funcionamiento. Es importante mencionar que mientras se encuentren activos, la vigilancia de los registros se realiza de manera continua con la finalidad de evidenciar cambios asociados a la dinámica del movimiento.

Acelerómetro: en la zona afectada, se utiliza un sensor de movimiento inercial (acelerómetro) para medir los ángulos de cabeceo y balanceo, lo que proporciona una medida indirecta de la inclinación del terreno y permite identificar mecanismos de falla. La Figura 2 muestra los registros del sensor durante el período evaluado.

Durante los 3 años de monitoreo, se han registrado cambios en la línea base tanto en cabeceo como en balanceo, con variaciones entre 1.9° y 3.5° , y entre -0.1° y -3° , respectivamente. Sin embargo, estos cambios han sido menores y casi imperceptibles debido a que se han dado de manera gradual a lo largo del tiempo. En consecuencia, se puede concluir que el terreno en superficie no ha experimentado inclinaciones considerables durante el período analizado, y por lo tanto, tampoco ha tenido cambios significativos en su mecanismo de falla. Este comportamiento refleja las características cinemáticas del movimiento en masa, donde se han presentado períodos de mayor desplazamiento a lo largo del período de monitoreo.

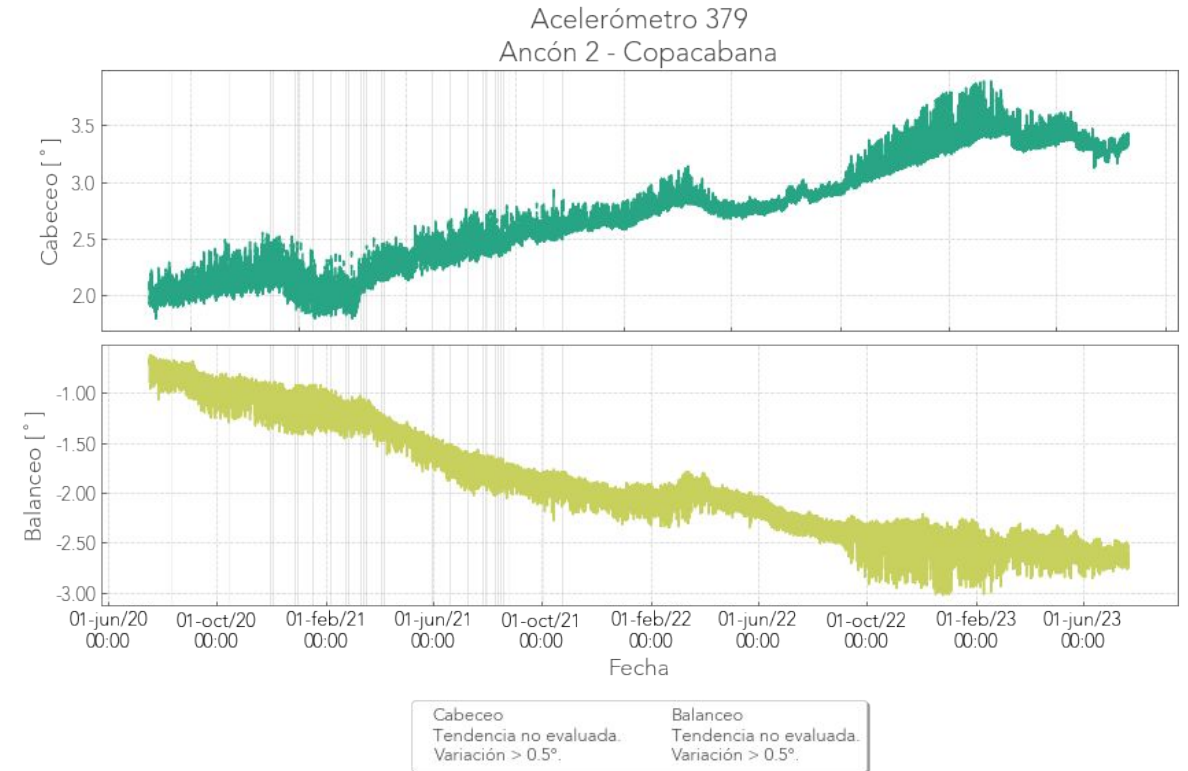


Figura 2. Inclinación del terreno representada en los ángulos de cabeceo y balanceo, medidas del acelerómetro.

Cable TDR - Time Domain Reflectometer: en el monitoreo de la zona Ancón II, se emplea un sensor TDR (Time Domain Reflectometer) que se encarga de identificar superficies de falla, deformación o desplazamiento en profundidad. Este sensor se instala en dos perforaciones ubicadas en distintos puntos del área afectada, como se puede apreciar en la Figura 1. Asimismo, se proporciona un esquema (Figura 3) que ilustra la configuración del sensor en el terreno.

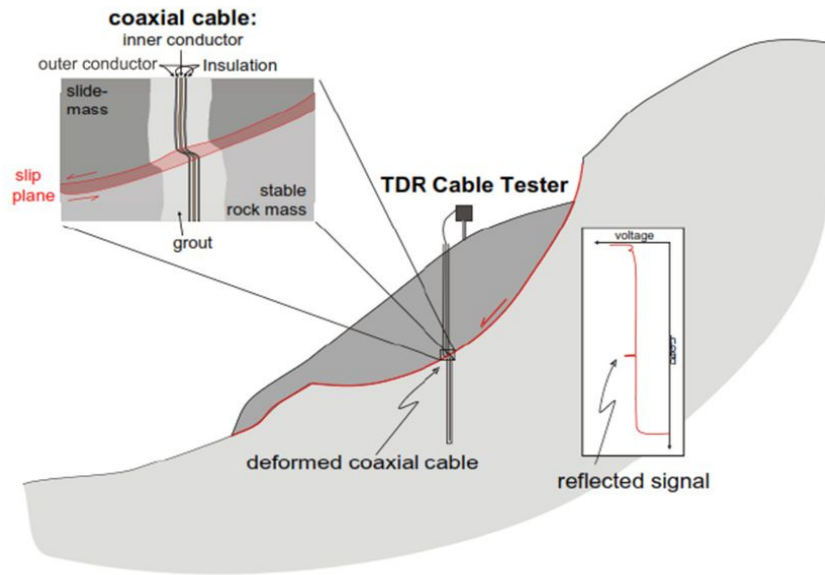


Figura 3. Esquema de instalación de un sistema de TDR en un movimiento en masa. Este esquema incluye un acercamiento de la zona de falla y cómo se vería una deformación en la gráfica.

El cable TDR 1 ha registrado múltiples zonas de deformación o superficies de falla representadas por los picos en la Figura 4. Las profundidades de esta zona son 11 m, 16 m y 20 m; lo cual indica superficies de falla profundas. De igual manera, el cable TDR 2 ha registrado una zona de deformación entre 22 y 26 m de profundidad, como se muestra en la Figura 5.

De acuerdo con la información suministrada por el sensor se puede concluir que el movimiento en masa del sector Ancón II, es un movimiento con múltiples zonas de deformación y desplazamiento en profundidad, lo que sugiere la existencia de condiciones geológicas complejas para la caracterización del mismo, y que el movimiento es en esencia profundo.

Reporte técnico de monitoreo: Sector Ancón II - Copacabana

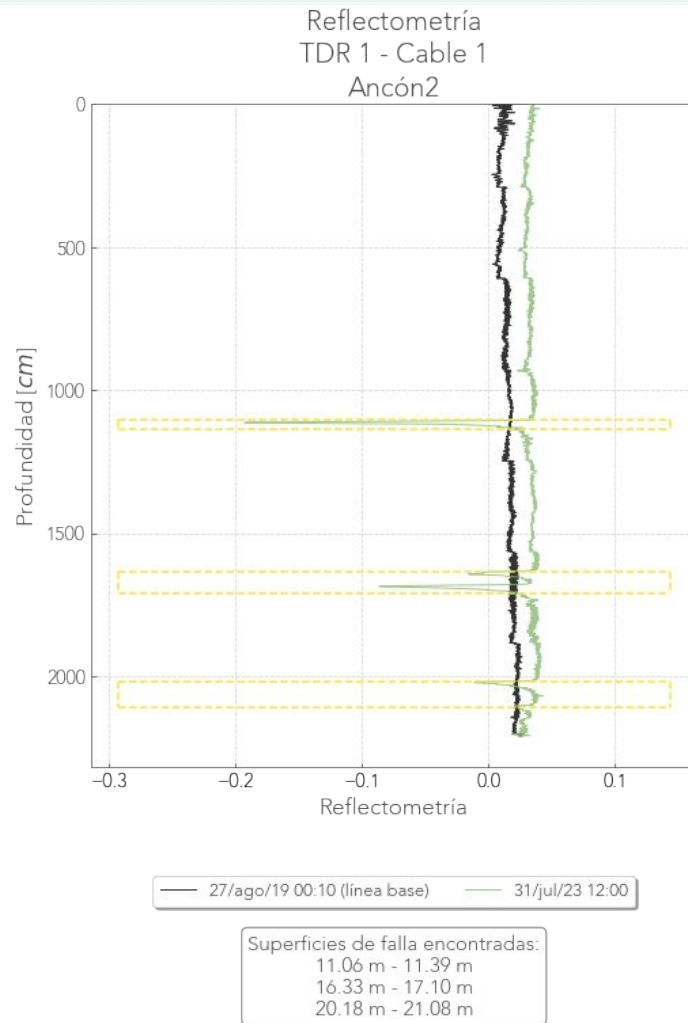


Figura 4. Registro del cable TDR 1 instalado en el movimiento en masa Ancón II.

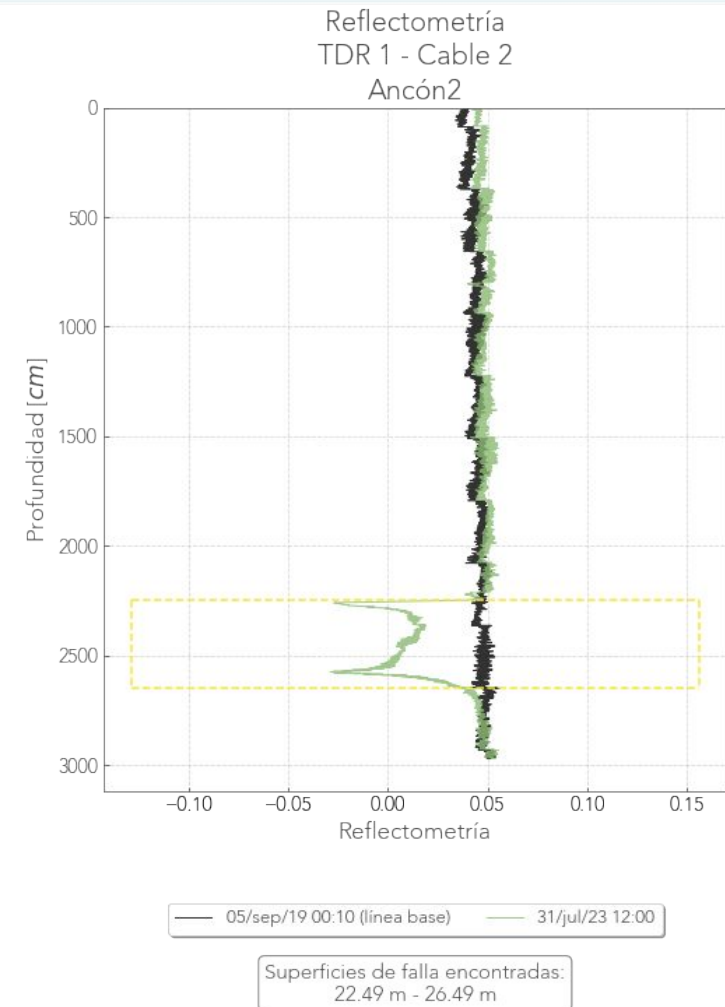


Figura 5. Registro del cable TDR 2 instalado en el movimiento en masa Ancón II.

Contenido volumétrico de agua: en la Figura 6 se presenta la información relativa al contenido volumétrico de agua en el suelo, que ha sido medido mediante un sensor de humedad en la zona del movimiento en masa de Ancón II (ubicación señalada en la Figura 1). Este sensor aporta datos relevantes para investigar la capacidad del suelo de drenar el agua después de eventos de precipitación y cómo esto afecta la dinámica del movimiento. El registro histórico, hasta su inactivación debido a causas externas, muestra que en este punto de monitoreo, el suelo reacciona de manera rápida ante la infiltración de agua por la lluvia y, en poco tiempo, regresa a su nivel de contenido de agua previo al evento pluvial.

Sin embargo, los datos presentados en la Figura 6 revelan que el sensor no regresó a su nivel habitual después del 1 de mayo de 2021 (fecha marcada con una línea roja). En cambio, se mantuvo en un nivel constante de 60% de contenido volumétrico de agua, lo que podría sugerir que el terreno se mantuvo saturado a la profundidad del sensor o que el propio sensor sufrió algún daño. Desafortunadamente, no fue posible corroborar esta situación debido a la imposibilidad de acceder al sitio, ya que existía un riesgo de colapso en un muro cercano a la ubicación del sensor. La medición del contenido volumétrico de agua en la zona no se reactivó.

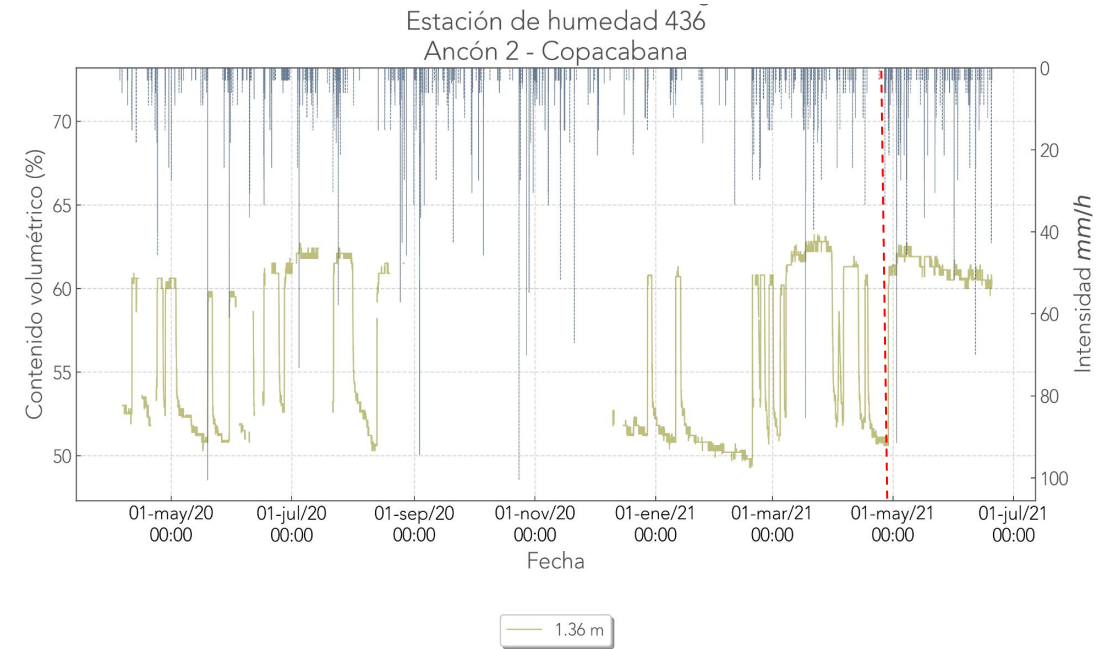


Figura 6. Registro histórico de la estación de humedad del suelo utilizada en el monitoreo del movimiento en masa. Este sensor se encuentra inactivo..

Extensómetro: este sensor se utiliza para medir los desplazamientos superficiales en el terreno y su información se correlaciona con la precipitación para evaluar su posible incidencia en el avance de los movimientos a través de grietas o fisuras. El registro del extensómetro instalado en el sitio (Figura 7), muestra que las precipitaciones comúnmente afectan el comportamiento del avance del movimiento.

Sin embargo, estos desplazamientos no siempre se deben exclusivamente a la presencia de lluvias, ya que la dinámica del movimiento en masa demuestra que se registran desplazamientos incluso en períodos de baja acumulación pluvial. Es importante destacar que la información de este sensor no es concluyente debido a que es susceptible a manipulación externa (por ejemplo, pisadas, tránsito de vehículos, cortes constantes del cable, etc.). Además, el valor acumulado muestra una apertura de hasta 1.37 m, lo cual no coincide con lo observado en campo (grietas de hasta 30 cm).

A la fecha, este sensor se encuentra inactivo. Es fundamental tener en cuenta estas limitaciones al interpretar los datos del extensómetro pues deben aproximarse y validarse con la información de campo para evidenciar datos anómalos.

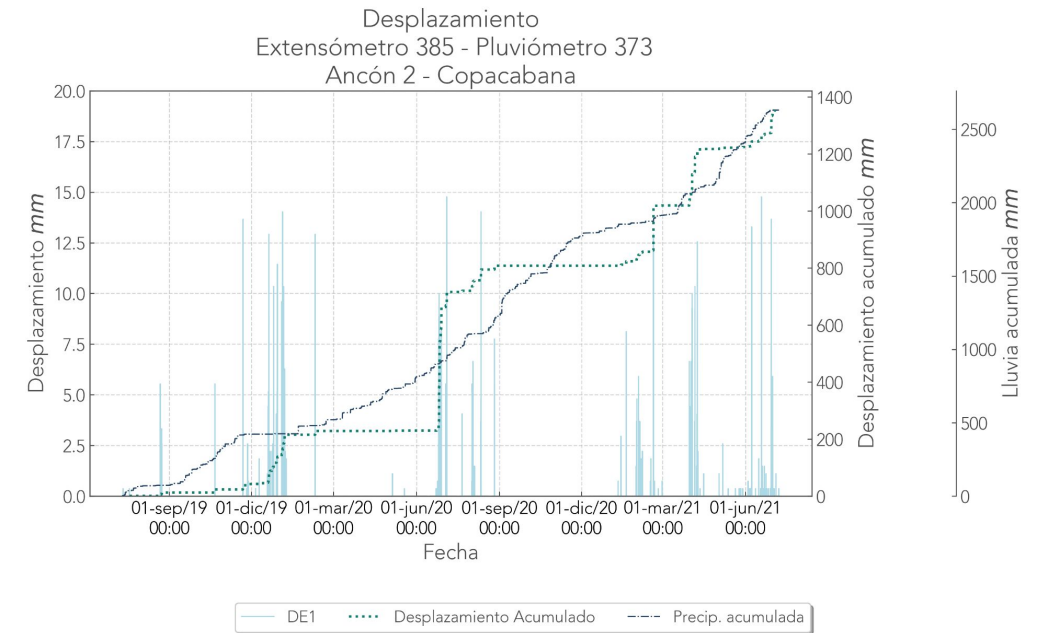


Figura 7. Registro del extensómetro 385. Este sensor se encuentra inactivo.

Monitoreo mediante sobrevuelos con dron

Los sobrevuelos con dron permiten tener una comparación cualitativa con respecto a los cambios que se evidencian en superficie en zonas afectadas por movimientos en masa, y en ocasiones generar algunos productos que ayudan a visualizar los cambios en el terreno. En total, el proyecto SIATA ha realizado 23 sobrevuelos con drones en el punto de interés de la zona Ancón II. En la Tabla 2, se muestra el resumen de los sobrevuelos realizados por año desde el inicio del monitoreo.

Año	Número de sobrevuelos
2019	4
2020	3
2021	9
2022	5
2023	2

Tabla 2. Número de sobrevuelos realizados por año para el movimiento en masa de Ancón II .

Reporte técnico de monitoreo: Sector Ancón II - Copacabana

En la Figura 8, se muestra la comparación cualitativa de la imagen de drone obtenida en abril de 2022 respecto a la primera imagen de julio de 2020, esta última es tomada como línea base de monitoreo. La figura permite evidenciar colores azules que indican un aumento de la cota del terreno, mientras que los colores amarillos a rojo indican un hundimiento del terreno; en la escala, el color rojo intenso indica profundidades mayores a 3 metros, y en un azul intenso cuando los llenos son mayores a 3 metros, dado que las imágenes no están amarradas a un sistema fijo de coordenadas los errores medios de geolocalización son de 75 cm, por lo cual el análisis no puede ser considerado cuantitativo.

En la Figura 8 se observan los puntos de control usados para alinear ambas imágenes (pin en cruz rojo), además de varias zonas de interés. En la zona 1 la diferencia de alturas corresponde al colapso o desmonte de edificaciones. En la zona 2, el color azul corresponde a un desplazamiento horizontal de las viviendas; En la zona 3, se observa una diferencia positiva (lleno antrópico), debido a que en este punto se realizó la excavación para la protección de la tubería del poliducto en 2020. Por otro lado, la zona 4 corresponde a una zona de socavación producida por el río Aburrá - Medellín.

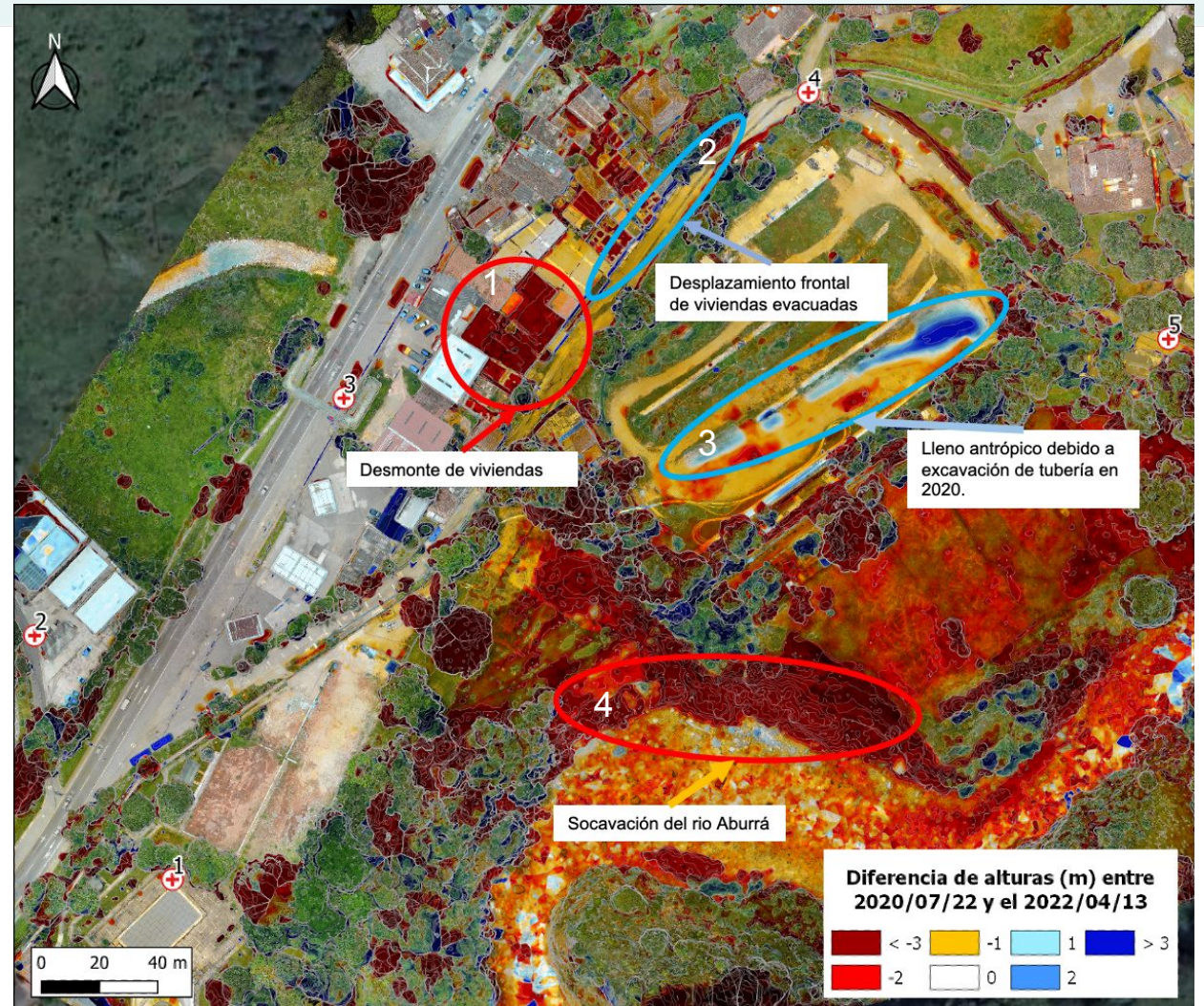


Figura 8. Mapa de calor obtenido con información de sobrevuelos RGB del 2020/07/22 Y 2022/04/13

Reporte técnico de monitoreo: Sector Ancón II - Copacabana

La Figura 9 permite visualizar de manera comparativa los cambios que ha sufrido la infraestructura en el lugar de interés en un periodo aproximado de dos años.

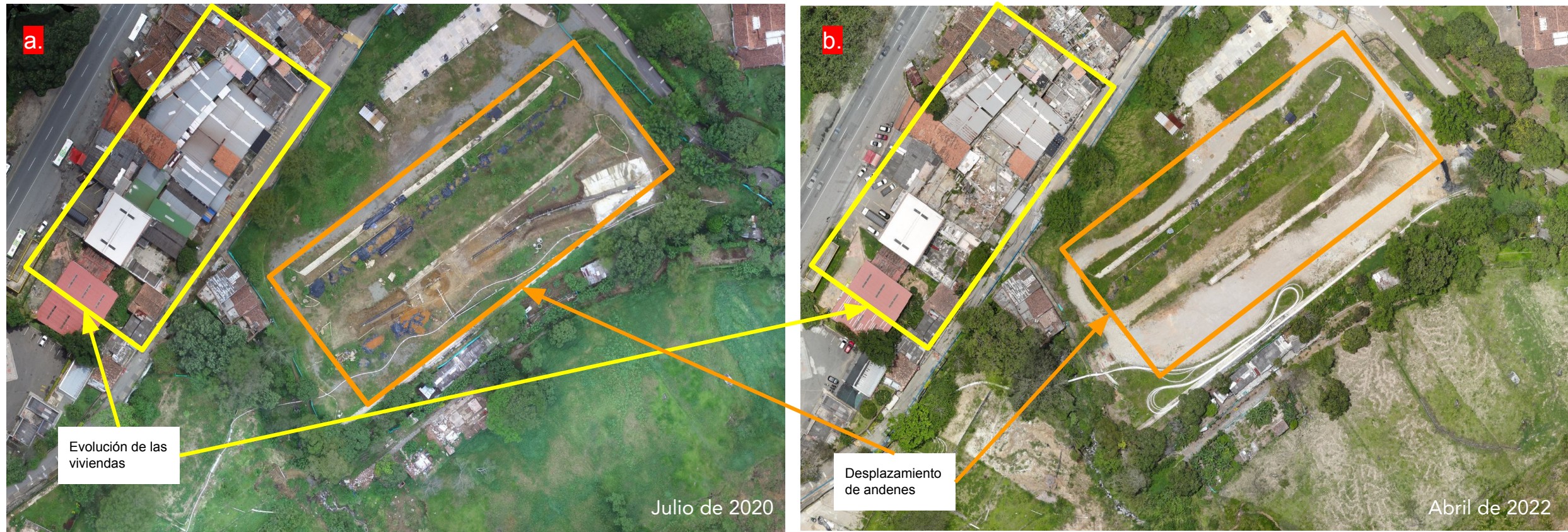


Figura 9. Sobrevuelos realizados con dron sobre la zona afectada. a) Imagen tomada del sobrevuelo realizado el 22 de julio de 2020. b) Imagen tomada del sobrevuelo realizado el día 13 de abril del año 2022. En recuadro amarillo Evolución de las viviendas y en recuadro naranja Desplazamiento de andenes

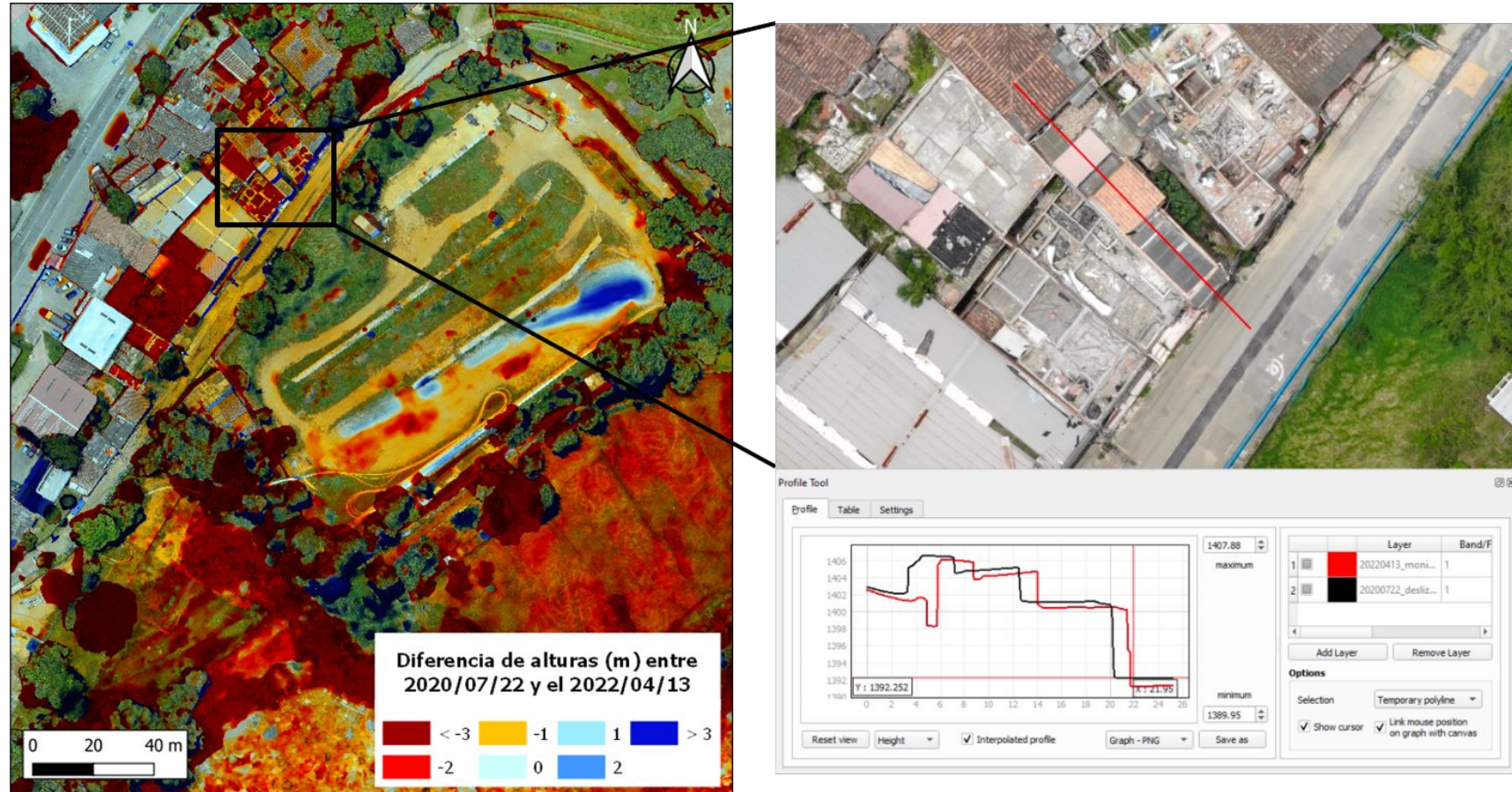


Figura 10. Perfil del terreno en la zona de interés 2, donde se han presentado desplazamientos entre el perfil de 2020 en color negro y perfil de 2022 en color rojo.

Reporte técnico de monitoreo: Sector Ancón II - Copacabana

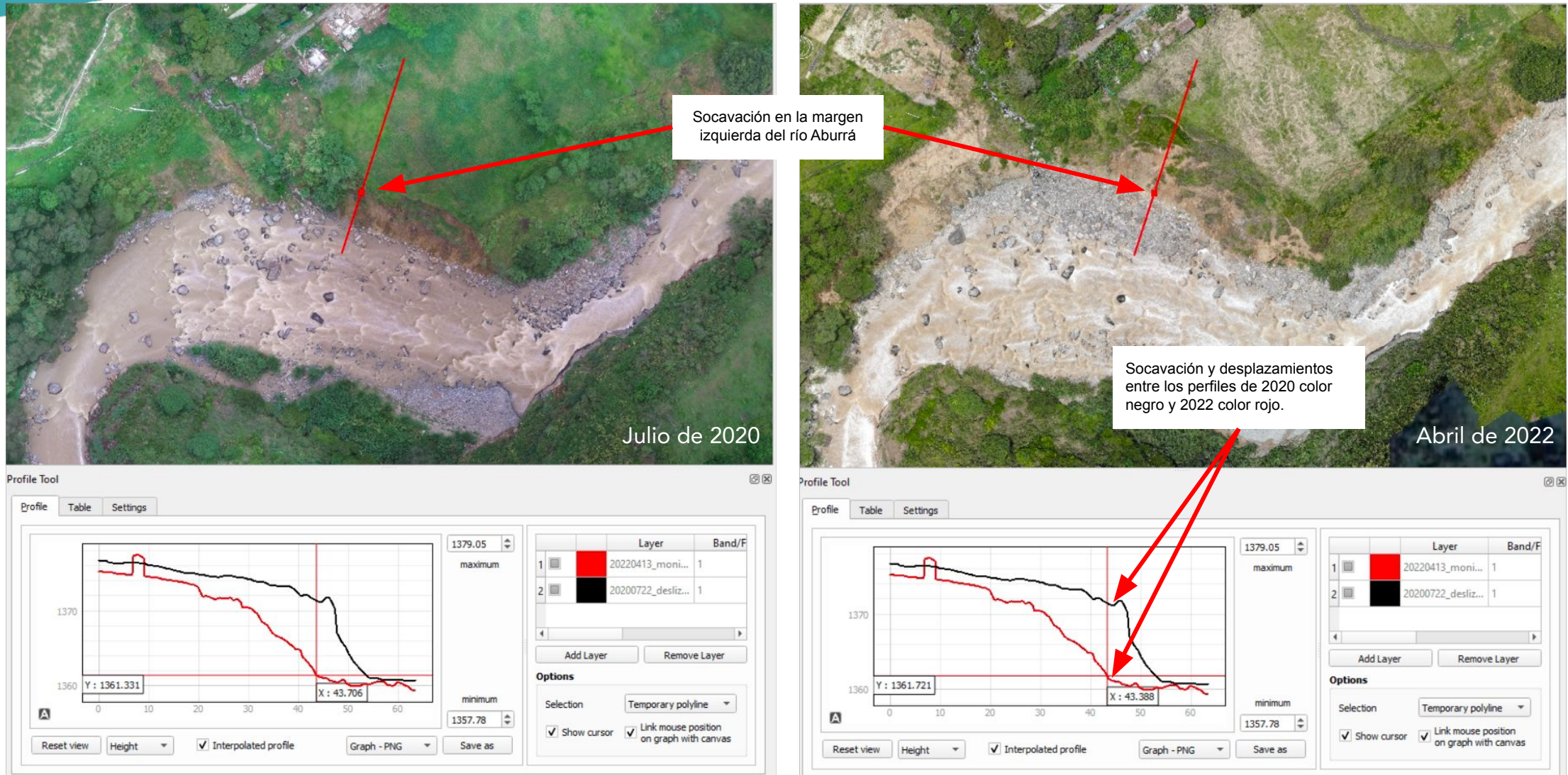
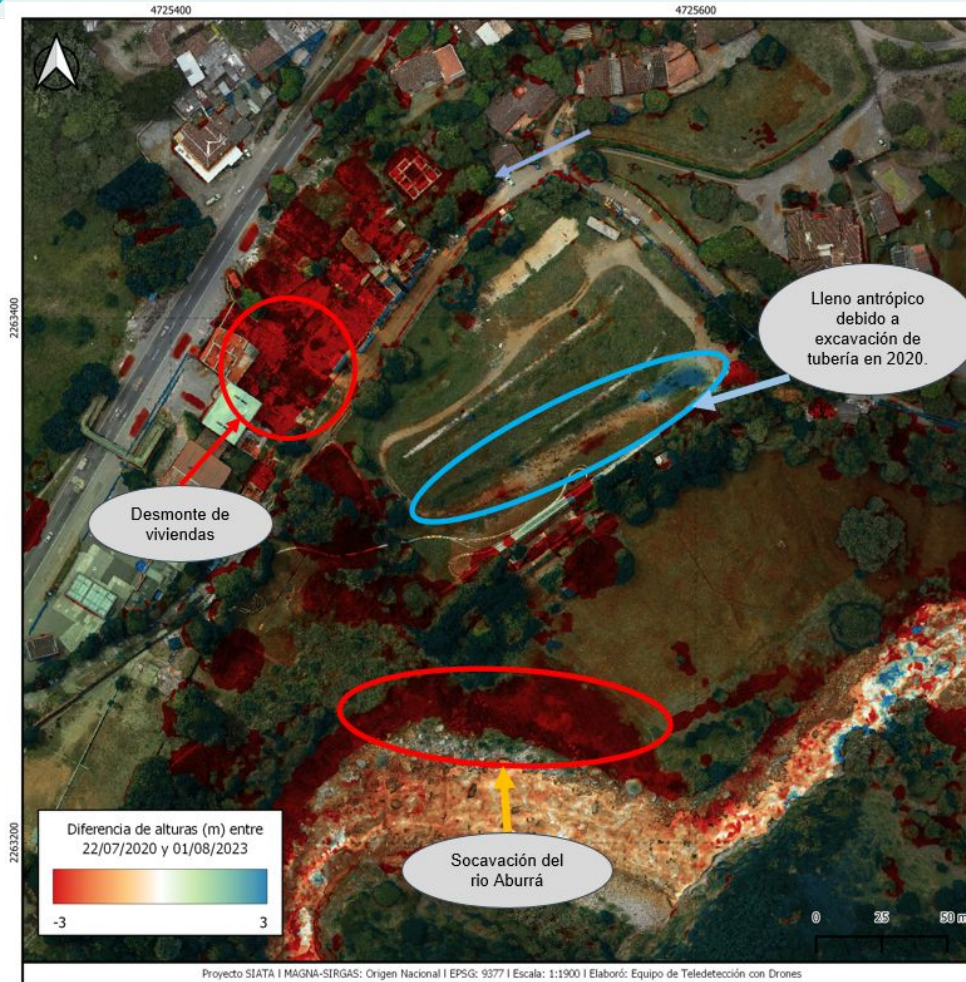
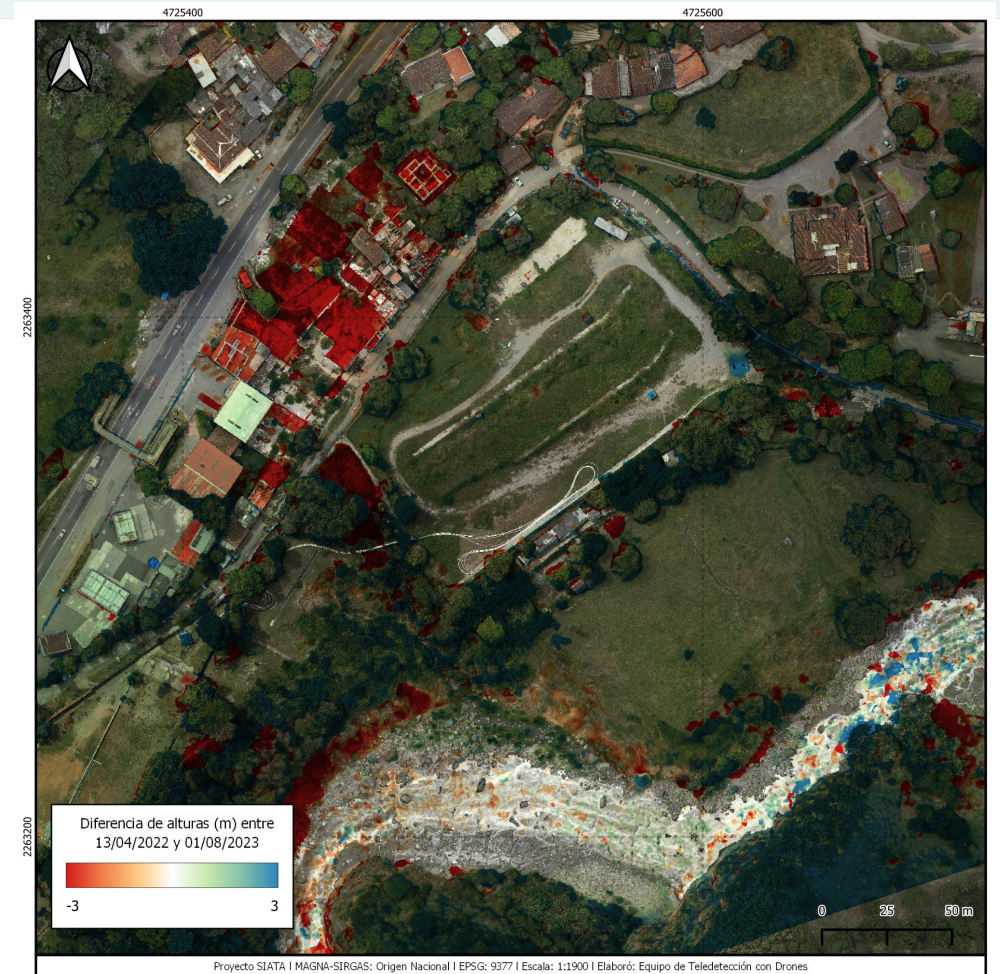


Figura 11. Perfil del terreno en la zona de socavación, donde se han presentado desplazamientos negativos importantes entre el perfil de 2020 en color negro y perfil de 2022 en color rojo.

Reporte técnico de monitoreo: Sector Ancón II - Copacabana

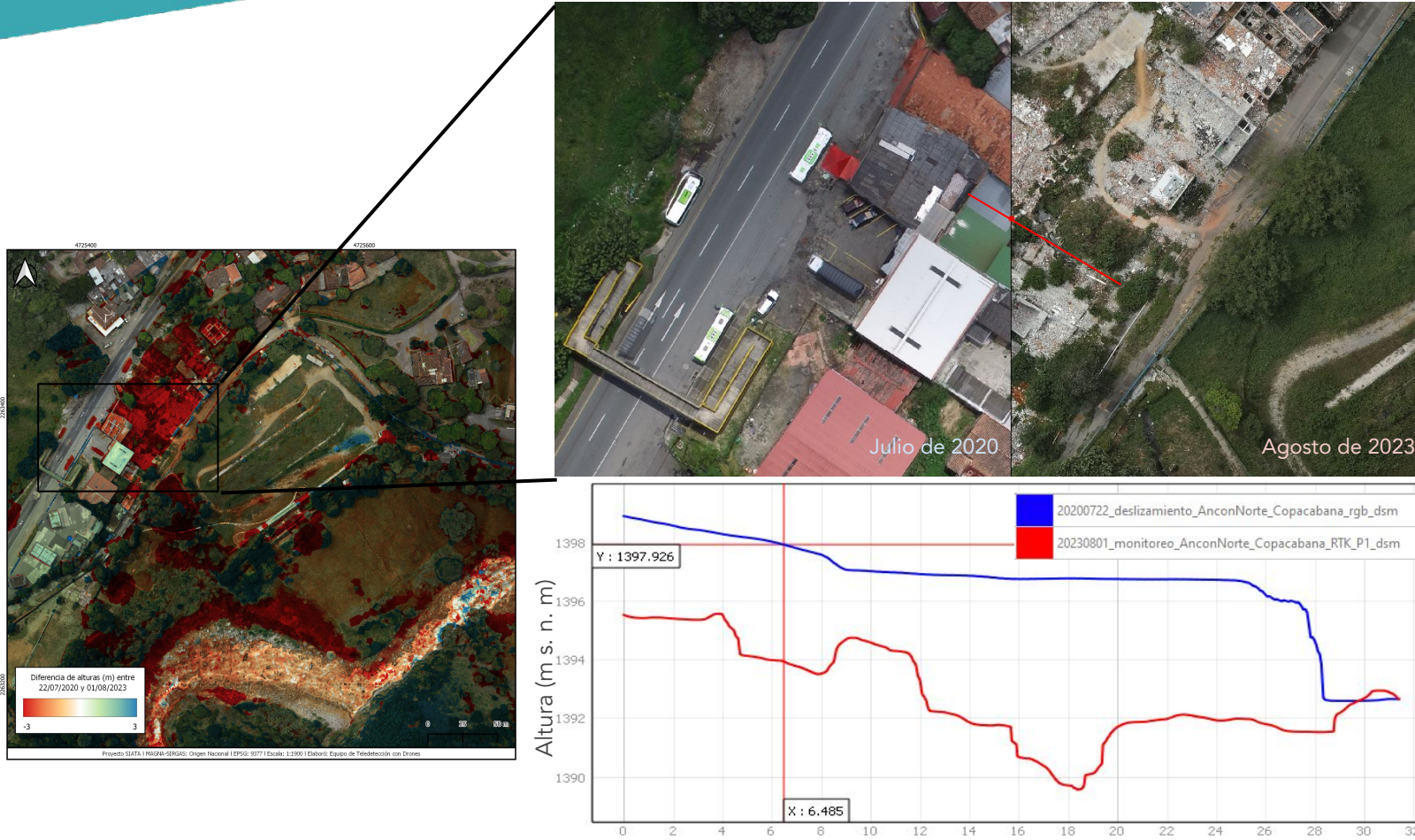


a. Comparación imagen drone 2020-2023



b. Comparación imagen drone 2022-2023

Figura 12. Mapa de desplazamientos obtenido a partir de la comparación de sobrevuelos realizados en julio de 2020, abril de 2022 y agosto de 2023. Entre el 2020 y el 2023 (Panel a) se observa socavación en una de las márgenes del río Aburrá-Medellín, el desmorte de algunas viviendas y una zona utilizada para lleno antrópico. Entre el 2022 y 2023 (Panel b), continúa la socavación en el río y el desmorte de viviendas.



Desmante de viviendas

En la Figura 12, se muestra el perfil de superficie en una zona donde se ha hecho el desmante paulatino de viviendas. El perfil de julio de 2020 en línea de color azul, y el perfil del terreno de agosto de 2023 en color rojo; los resultados indican el desmante casi total de las edificaciones (cambio de altura negativo).

Adicionalmente, se observa crecimiento de vegetación en general, lo que se identifica en colores azules en el mapa (cambio de altura positivo).

Figura 13. Perfil del terreno en zona donde se ha hecho desmante de viviendas. En color azul, el perfil obtenido con la image de drone de julio de 2020, y en color rojo la imagen del sobrevuelo de agosto de 2023.

Metros (m)

Reporte técnico de monitoreo: Sector Ancón II - Copacabana

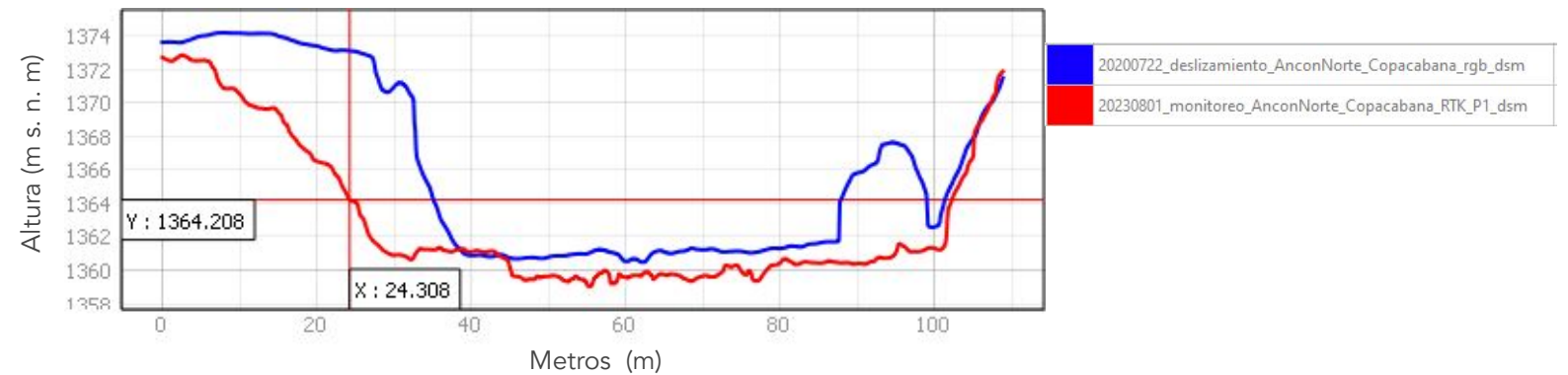


Figura 14. Perfil del terreno en la zona de socavación, donde se han presentado desplazamientos negativos importantes entre el perfil de 2020 en color azul y perfil de 2023 en color rojo. Desde que se tiene registro de sobrevuelo (2020), la socavación del margen del río Aburrá-Medellín no se ha detenido

Reporte técnico de monitoreo: Sector Ancón II - Copacabana



Figura 15. Sobrevuelo realizado el 24 de junio de 2022, con drones tipo FPV y de jaula, para ingresar en el sector a estructuras confinadas y en riesgo de colapso. El objetivo de esta solicitud fue hacer una evaluación previa al desmonte seguro de las edificaciones, e identificar rutas de ingreso.



Monitoreo mediante imágenes satelitales

Desde el mes de mayo del presente año, el equipo de movimientos en masa ha implementado herramientas de monitoreo de movimientos en masa con imágenes satelitales, una de las técnicas usadas es la Interferometría de Radar de Apertura Sintética o InSAR.

El principio fundamental de InSAR se basa en medir la diferencia de fase entre dos imágenes de radar adquiridas en diferentes momentos en el tiempo sobre la misma área. Esta diferencia de fase está directamente relacionada con el desplazamiento vertical o lateral experimentado por la superficie observada. Al procesar y combinar múltiples pares de imágenes, es posible obtener mapas precisos y coherentes de los movimientos en masa que han ocurrido durante el período de estudio.

En el caso de Ancón II, se han procesado imágenes de la misión satelital Sentinel 1 de la Agencia Espacial Europea desde el año 2016 hasta la actualidad, encontrando una zona de deformación en la ladera que se extiende por más de 2 km al noroccidente del perímetro definido a partir de las afectaciones del sitio de interés. A continuación se presentan los resultados del análisis.

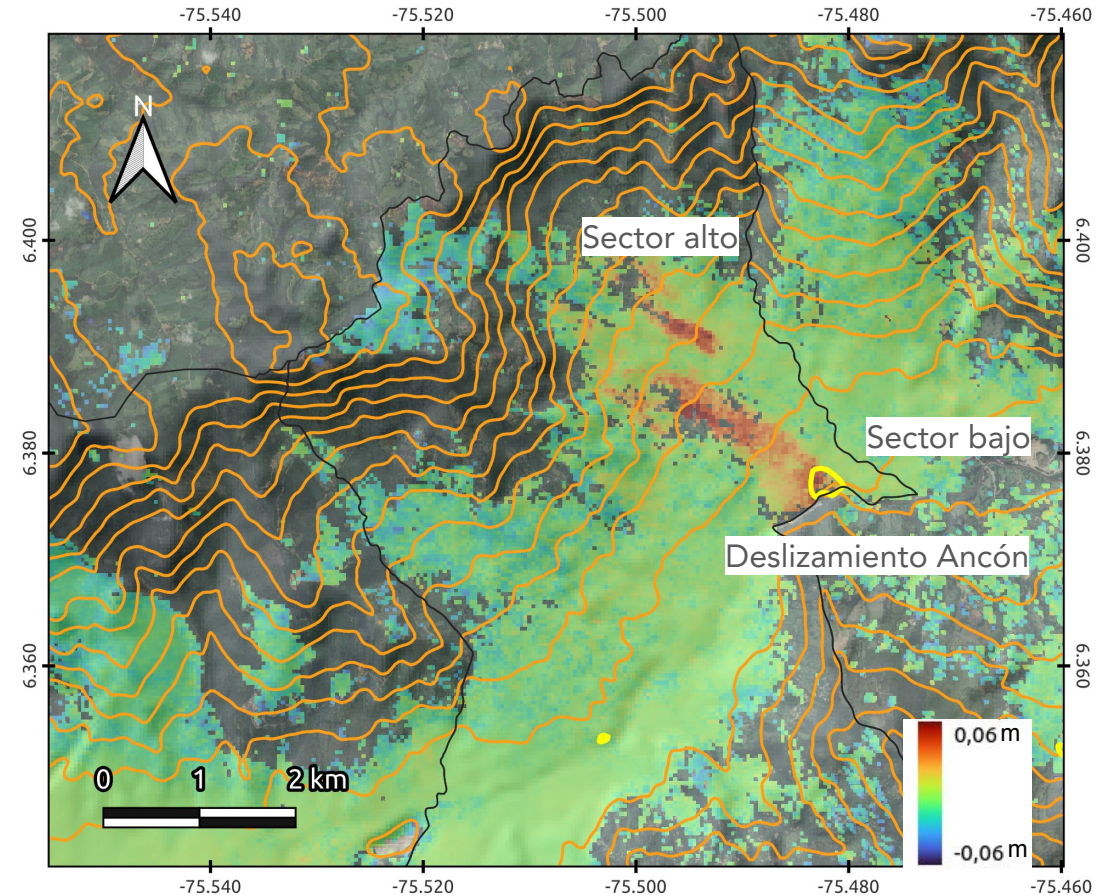


Figura 16. Mapa de desplazamientos resultante del análisis InSAR de la zona Ancón II. La magnitud de los desplazamientos corresponde a desplazamientos hacia la ubicación del satélite, aproximadamente a 45° de inclinación vertical al este. El polígono amarillo representa el perímetro delimitado a partir de las afectaciones en el barrio Ancón II.

Reporte técnico de monitoreo: Sector Ancón II - Copacabana

Monitoreo mediante imágenes satelitales

Como se muestra en la Figura 12. La zona de deformación identificada con el análisis InSAR es mucho mayor al perímetro en el cual se han presentado las afectaciones; sin embargo, la serie de tiempo de esta zona es consistente con los registros que se tiene, en donde se observa el inicio de las deformaciones en el año 2018 (ver Figura 12) , mismo año en el que el Área Metropolitana inicia las visitas técnicas al lugar.

El análisis InSAR muestra desplazamientos con periodos de aumento en la velocidad del movimiento del terreno tanto en la parte alta como en la parte baja de la zona de deformación.

Los resultados de este análisis deben ser evaluados con recorridos en campo e instrumentación geotécnica en la zona exterior al perímetro delimitado inicialmente; por lo cual, deben ser interpretados teniendo en cuenta la incertidumbre de la técnica.

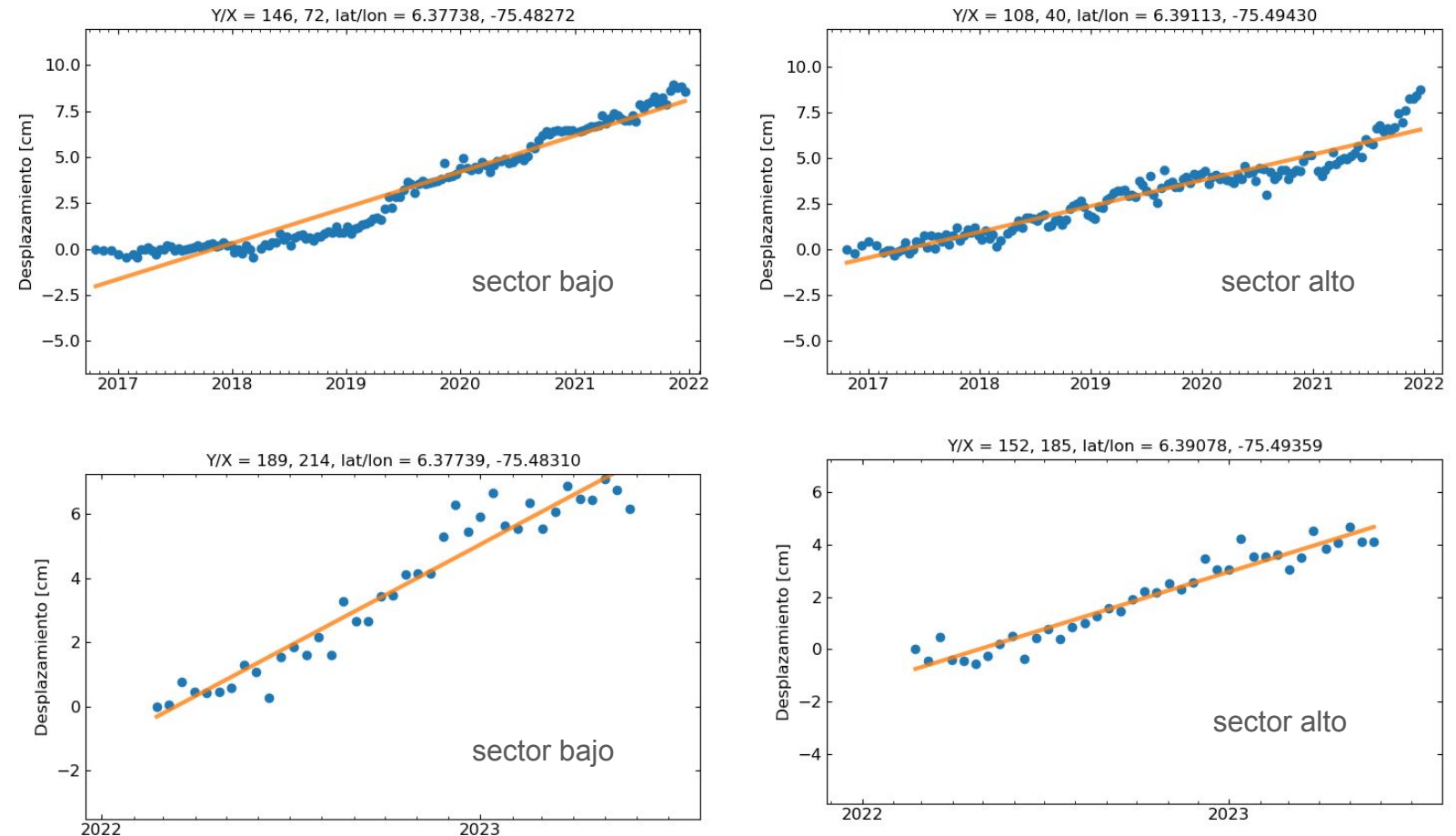


Figura 17. Series de tiempo de los sectores alto y bajo de la zona de deformación identificada en el análisis InSAR (ver Figura 16)

Conclusiones

- Los sensores en tierra que han hecho parte del esquema de monitoreo en el Sector Ancón II, o que siguen estando activos, han registrado desplazamientos superficiales y subsuperficiales, permitiendo respaldar los hallazgos y evidencias levantadas durante las diferentes visitas y recorridos de campo.
- De acuerdo con la información suministrada por los sensores en profundidad, la principal zona de deformación se encuentra entre 22 m y 27 m de profundidad. En esa zona, se registró el rompimiento del cable 1 del sensor TDR el 21/Junio a las 01:00 am, sugiriendo magnitudes considerables de desplazamiento.
- Es posible concluir a partir de la información del acelerómetro que el comportamiento en la zona es característico de un movimiento en masa tipo deslizamiento planar. Esto es posible validarlo a través de los productos de los sobrevuelos con LiDAR, ya que en estos no se observan hundimientos en la zona monitoreada, pero sí se ve el cambio de los objetos respecto a la posición inicial.
- Las inclinaciones en el terreno no cambian a pesar de la incidencia de las precipitaciones en la zona, que como se evidencia puede llegar a tener acumulados considerables en cada temporada de lluvias. Durante los últimos 2 años, los acumulados de precipitación han estado por encima del valor promedio, alrededor de un 30%. Esto permite continuar respaldando la hipótesis del movimiento planar.
- Los sobrevuelos con drone han permitido evidenciar los cambios en el terreno, donde en general se han visto desplazamientos negativos asociados a pérdida de altura por el desmonte de edificaciones y desplazamientos del terreno. También se ha observado, desde el 2020, el socavamiento continuo de la margen oriental del río Aburrá-Medellín.
- Los análisis recientes que se han adelantado para el entendimiento y caracterización del movimiento a través de InSAR, soportan que la naturaleza del proceso es compleja y se deriva de muchos factores que pueden ir desde la dinámica de la quebrada hasta componentes geológicos y geotécnicos de mayor escala.

Reporte técnico de monitoreo: Sector Ancón II - Copacabana

ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ
Juliana Álvarez Líder equipo Movimientos en masa Alejandro Ospina Analista equipo Movimientos en masa José Lozano Líder(e) equipo Teledetección con drones Jhon Zuluaga Analista equipo Teledetección con drones	Alejandra Ochoa Equipo hidrología, Líder equipo Operacional Lina Ceballos Coordinadora técnica Riesgos	Lina Ceballos Coordinadora técnica Riesgos