



ATLAS

DE ÁREAS DE INTERÉS PARA
LA EXPLORACIÓN DE ENERGÍA
GEOTÉRMICA EN COLOMBIA



Uptc[®]
Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia

ANH
AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS



ATLAS

DE ÁREAS DE INTERÉS PARA
LA EXPLORACIÓN DE ENERGÍA
GEOTÉRMICA EN COLOMBIA



Uptc[®]
Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia

ANH
AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS



ANH Agencia Nacional de Hidrocarburos

Orlando Velandia Sepúlveda
Presidente

María Cecilia Ruiz Cardona
Vicepresidenta Técnica

Carlos Ernesto García Ruiz
Experto - Vicepresidencia Técnica

UPTC Sogamoso

Héctor Antonio Fonseca
Decano

Supervisores del Proyecto:

Oscar García Cabrejo
Luis David Mesa

Director Subproyecto 1:

Luis Enrique Bernal Vargas

Equipo de trabajo:

Alejandro Pinilla Ocampo, Angela Valeria García Lara, Carlos Andrés Moreno Medina
Diana Carolina Borda Beltrán, Jorge Hernán Buitrago Núñez, Jhon Camilo Matiz León.

Fotografía:

Jaír Ramírez Cadena

Dirección de arte y diseño:

Ana Berrio


Diseñadores:

Yury Alejandra Cuaran Bedoya
Sergio Adrián López Isaza

Copyright © Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH
Primera edición, diciembre 2024



CONTENIDO



INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El proyecto: "ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DATOS DE SENSORES REMOTOS EN ÁREAS DE INTERÉS PARA PROYECTOS DE EXPLORACIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA", tiene como objetivo principal evaluar el potencial geotérmico en diversas regiones de Colombia. Para ello, se utiliza tecnología avanzada de sensores remotos, incluyendo imágenes satelitales multiespectrales, hiperspectrales y térmicas. Estas herramientas permiten analizar las condiciones superficiales del terreno e identificar indicadores clave asociados al potencial geotérmico, fomentando el desarrollo de fuentes de energía alternativa, particularmente en zonas volcánicas y en cuencas sedimentarias.

El área de estudio incluye regiones con actividad volcánica reciente localizadas en las Cordilleras Central y oriental, así como cuencas sedimentarias. En estas zonas se identificaron diez (10) polígonos con posible potencial geotérmico: Guajira, VIM-Cesar, Morrosquillo-Cansona, Arauca, Paipa-Samacá, Trinidad, Llanos, Cordillera Oriental-Paipa-Iza, Cordillera Central Norte (Norte) y Cordillera Central Centro (Centro).

A partir de los resultados preliminares de la interpretación regional de las variables geotérmicas -como Flujo de Calor, Temperatura Superficial, Alteraciones Hidrotermales, Cartografía Mineral y Geobotánica- y su relación con las Condiciones Geológicas, se priorizaron cinco (5) polígonos como los más prometedores: VIM-Cesar, Arauca, Paipa-Samacá (CO-Paipa-Iza en su interior), norte y centro. Estas áreas son objeto de análisis más detallados para determinar su viabilidad geotérmica.

Para el desarrollo del proyecto, se emplearon imágenes satelitales de alta resolución

provenientes de plataformas como *Landsat 8*, *ASTER*, *Sentinel-2*, y *The Environmental Mapping and Analysis Program (EnMap)*. Los resultados se complementaron con análisis de imágenes *PlanetScope* y sensores térmicos e hiperspectrales de alta precisión, adquiridos por medios aerotransportados y Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV, por sus siglas en inglés).

Los resultados incluyen mapas temáticos que ilustran la distribución espacial de las variables analizadas. Esta información, integrada con datos secundarios compilados y analizados, así como con hallazgos obtenidos a partir de controles de campo, muestreos y análisis de laboratorio, permitió delimitar y categorizar áreas potenciales. De esta manera, se definieron *Targets* (objetivos exploratorios) para continuar con el proceso de factibilidad, con miras a la incorporación de fuentes de energía alternativa para el abastecimiento futuro.

Este proyecto es de alta relevancia para promover la exploración y aprovechamiento de la energía geotérmica en Colombia. Su ejecución respalda los esfuerzos hacia una transición energética sostenible y diversificada, mediante el uso de fuentes limpias que contribuyan al bienestar ambiental y al desarrollo económico del país.

CAPÍTULO 1

Bloques geotérmicos de Colombia



CAPITULO 1. BLOQUES GEOTÉRMICOS DE COLOMBIA

Los diez bloques priorizados para este análisis abarcan áreas con una notable diversidad geológica, climática y topográfica, que van desde las regiones costeras del Caribe hasta las llanuras orientales y los altiplanos de la región Andina. Cada bloque fue seleccionado estratégicamente para evaluar su viabilidad en estudios geotérmicos, tomando en cuenta la información disponible y sus características particulares. Sin embargo, no todos los bloques cumplen con los requisitos mínimos de información espacial, temporal y resultados significativos que justifiquen la continuación del proceso exploratorio, al menos en el corto plazo.

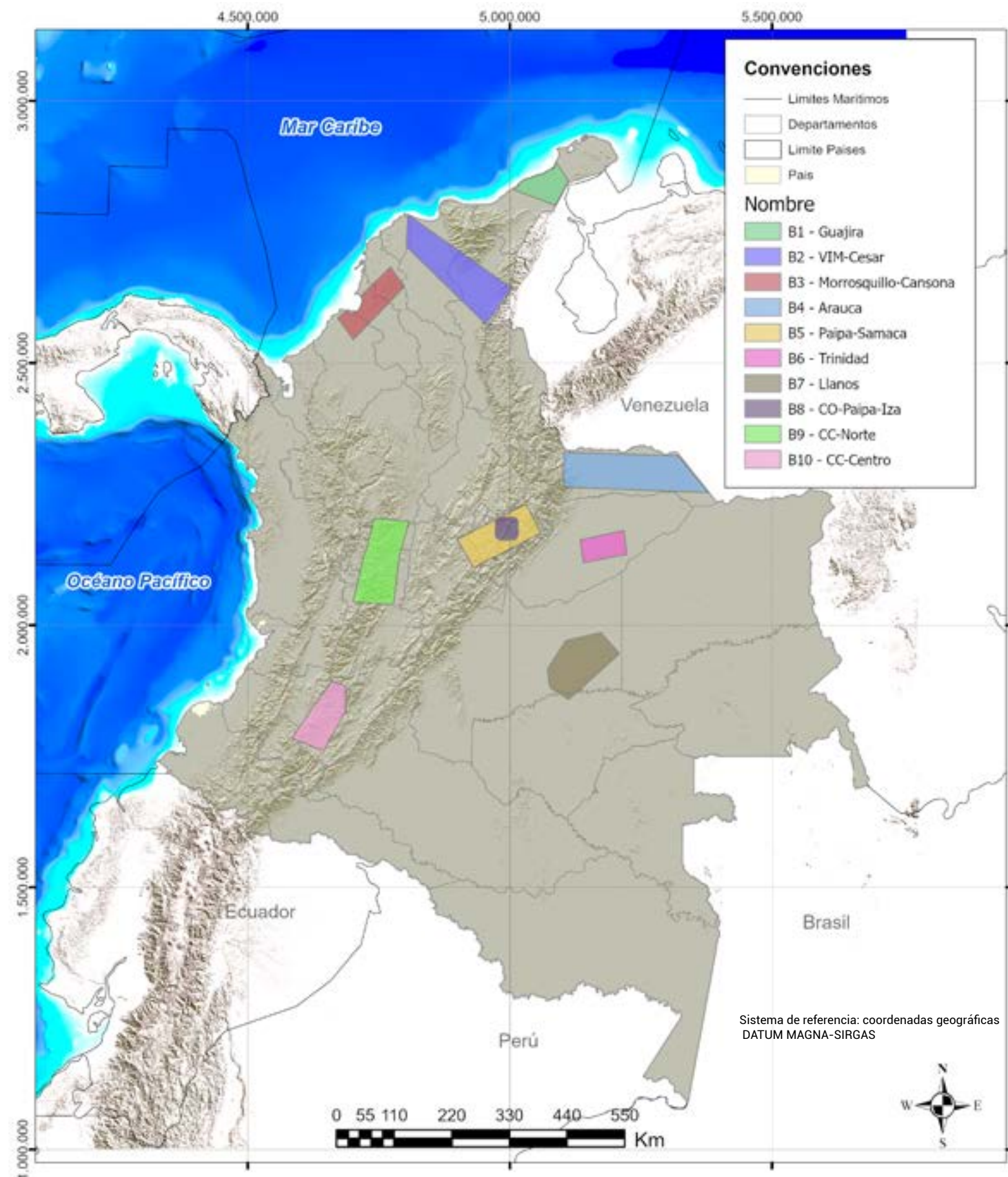
1. Polígono La Guajira: Ubicado en el extremo norte del país, este bloque se caracteriza por un clima árido y una diversidad geológica que incluye rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, cubiertas por depósitos aluviales y eólicos. Tales características representan un escenario preliminar prometedor para iniciar el procesos exploratorio. La interacción entre los marcados contrastes geográficos y las condiciones climáticas extremas, hacen de este polígono un área de interés clave para evaluar su potencial geotérmico.

2. Polígono VIM-Cesar: Ubicado en la región Caribe, este bloque se caracteriza por una geología rica y compleja, dominada por cuencas sedimentarias y estructuras tectónicas activas. Estas condiciones favorecen la acumulación de calor en el basamento, lo que justifica un análisis más detallado en ñas etapas avanzadas del proceso exploratorio.

3. Polígono Morrosquillo-Cansona: Este bloque comprende una combinación de áreas costeras y regiones de baja elevación, tanto en el ámbito continental como marino. Su configuración geográfica ofrece una oportunidad única para investigar el potencial de generación y acumulación de calor geotérmico en un entorno de plataforma, destacándose como un área de interés para exploraciones futuras.

4. Polígono Arauca: Situado entre el piedemonte llanero y las planicies de los Llanos Orientales, este bloque está cubierto por sedimentos recientes que configuran un contexto hidrogeológico particular, influyendo en la exploración geotérmica en zonas de baja altitud. Aunque su topografía no es uniforme y se caracteriza por desarrollar cuencas sedimentarias profundas, su potencial

Figura 1.1. Bloques (o áreas) de estudio para la exploración de energía geotérmica: 1. Guajira; 2. VIM-Cesar; 3. Morrosquillo-Cansona; 4. Arauca; 5. Paipa-Samacá; 6. Trinidad; 7. Llanos; 8. CO-Paipa-Iza; 9. CC-Centro; 10. CC-Norte.





geotérmico está asociado a las condiciones litoestratigráficas e hidrológicas que permiten almacenar calor generado por el basamento o la actividad tectónica reciente. Este último factor se asocia a la Orogenia Andina y la correspondiente actividad de las fallas Guaicáramo y Piedemonte Llanero, lo que convierte al polígono en un área atractiva para continuar con el proceso exploratorio.

5. Polígono Paipa-Samacá: Situado en el altiplano cundiboyacense, este bloque se destaca por la presencia de manifestaciones termales conocidas. Los estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos disponibles lo posicionan como una de las áreas prioritarias para el desarrollo de estudios geotérmicos en el país, gracias a su alto potencial y características favorables para la generación de energía.

6. Polígono Trinidad: También en los Llanos Orientales, este bloque combina una topografía baja con formaciones sedimentarias profundas, convirtiéndose en un área estratégica para la evaluación de recursos energéticos alternativos y el análisis de su viabilidad geotérmica a largo plazo.

7. Polígono Llanos: Este bloque, localizado en los Llanos Orientales en la margen derecha del río Guaviare (Departamento del Meta), se destaca por su potencial en recursos geotérmicos profundos. Su interés radica en las condiciones litoestratigráficas e hidrológicas de las unidades geológicas de la cuenca, las cuales tienen la capacidad para almacenar el calor generado por el basamento igneo-metamórfico del Escudo de Guyana, que subyace la cuenca profunda del oriente colombiano.

8. Polígono CO-Paipa-Iza: Localizado en el departamento de Boyacá, este bloque cuenta con historial de actividad hidrotermal en el altiplano, lo que refuerza su relevancia como área prioritaria para la evaluación de fuentes

geotérmicas. Su geología diversa ofrece un escenario prometedor para futuras exploraciones en búsqueda de energía renovable.

9. Polígono CC-Centro: Situado en la región central del país, este bloque ofrece un recurso geotérmico hidrotermal típico de sistemas convectivos, asociado a la actividad volcánica producto de la tectónica convergente de las placas Nazca y Suramericana. Dicha interacción ha generado sistemas montañosos y microcuencas sedimentarias que ofrecen condiciones propicias para la acumulación y aprovechamiento de energía geotérmica. Su ubicación estratégica, junto con sus características geológicas relevantes, lo posicionan como región con alto potencial para el desarrollo de estudios geotérmicos detallados y futuras evaluaciones.

10. Polígono CC-Norte: Localizado en el norte de la región Andina, este bloque se caracteriza por sus estructuras geológicas complejas y la presencia de manifestaciones termales significativas. Estas características lo posicionan como una zona prioritaria para la exploración geotérmica, destacándose por su alto potencial para la identificación de fuentes de energía sostenible y almacenamiento térmico.

En conjunto, los diez polígonos seleccionados representan un panorama diverso y estratégico para la exploración geotérmica en Colombia. Si bien, no todos cumplen con los criterios para avanzar a estudios detallados en esta etapa, su evaluación inicial establece una base sólida para futuras investigaciones. Esta priorización permite enfocar los esfuerzos en aquellos bloques que presentan mayor evidencia de actividad geotérmica y condiciones favorables para el desarrollo de energía sostenible.



Fotografía: Jaír Ramírez Cadena





CAPÍTULO 2

Información geoespacial



CAPÍTULO 2. INFORMACIÓN GEOESPACIAL

El Atlas Geotérmico es una herramienta visual e informativa que compila y organiza información geoespacial clave para identificar y evaluar zonas con potencial geotérmico. Este documento integra datos obtenidos a partir de sensores satelitales, imágenes aéreas y tecnología avanzada, permitiendo analizar diversas variables geotérmicas como el flujo de calor, la temperatura superficial, las alteraciones hidrotermales, la cartografía mineral y la caracterización geobotánica. Gracias a estas fuentes de información, es posible explorar y priorizar áreas para estudios más detallados y proyectos futuros en energía geotérmica.

¿Qué es la Información Geoespacial?

La información geoespacial se refiere a datos obtenidos desde sensores remotos que capturan imágenes y mediciones de la superficie terrestre desde satélites, drones y otras plataformas aéreas. En el caso del atlas, esta información permite observar cómo el terreno y la vegetación responden a las condiciones subterráneas, ayudando a identificar señales indirectas de actividad geotérmica. Cada sensor utilizado aporta una perspectiva única, dependiendo de sus características técnicas y capacidades.

Sensores Utilizados y sus Características

La representación cartográfica del Atlas Geotérmico utiliza como sistemas de referencia, coordenadas geográficas datum Magna-Sirgas al igual que coordenadas planas datum Magna-Sirgas Origen Nacional.

1. **Landsat 8**: Este satélite, operado por la NASA, proporciona imágenes

multiespectrales y térmicas de alta calidad con una resolución de 30 metros para datos ópticos y 100 metros para datos térmicos. Es ideal para medir la temperatura superficial y realizar análisis de alteraciones hidrotermales. Además, su amplia cobertura temporal permite realizar análisis multitemporales que ayudan a identificar tendencias y cambios en el tiempo.

2. **Sentinel-2**: Parte del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea, este sensor ofrece imágenes con una resolución de hasta 10 metros, permitiendo identificar detalles precisos en la vegetación y la superficie terrestre. Es fundamental para estudios de cartografía geobotánica y mineral, y su alta frecuencia de revisita (cada 5 días) lo hace ideal para monitorear dinámicas a corto plazo.
3. **ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)**: Este sensor, montado en el satélite Terra, proporciona datos multiespectrales y térmicos con resoluciones que van desde 15 a 90 metros. Es particularmente útil para cartografía de minerales y alteraciones hidrotermales gracias a su capacidad para medir emisiones térmicas y reflejos en la superficie.
4. **PlanetScope**: Un conjunto de satélites de observación terrestre que generan imágenes con una resolución excepcional de 3 metros. Estos datos se emplean específicamente para la cartografía geobotánica, al ofrecer un nivel de detalle que facilita identificar patrones de vegetación en áreas pequeñas.
5. **EnMap (Environmental Mapping and Analysis Program)**: Este sensor hiperspectral captura datos en cientos de bandas espectrales, permitiendo analizar en detalle las propiedades químicas y físicas del terreno. Es clave para identificar variaciones minerales y alteraciones hidrotermales.



Fotografía: Jaír Ramírez Cadena



6. **Drones con Sensores Térmicos e Hiperespectrales:** Las aeronaves no tripuladas, equipadas con sensores avanzados, permiten capturar información térmica e hiperespectral en alta resolución y en áreas específicas de interés. Estas herramientas son esenciales para complementar los datos satelitales y proporcionar una visión más detallada en estudios locales.

Variables Geotérmicas y su Importancia

- **Flujo de Calor y Temperatura Superficial:** Estas variables reflejan el calor que se transfiere desde el subsuelo hacia la superficie. Las anomalías térmicas pueden ser indicadores clave de actividad geotérmica. Además, su monitoreo a través del tiempo permite entender la dinámica térmica en relación con otros factores geológicos y ambientales.
- **Alteraciones Hidrotermales:** Estas ocurren cuando los fluidos calientes del subsuelo alteran los minerales de la superficie. Identificar estas áreas puede ser crucial para entender los procesos geotérmicos subyacentes.
- **Cartografía Mineral:** Analizar los minerales presentes en una zona ayuda a identificar las condiciones geológicas que favorecen la actividad geotérmica. En este proceso, se mapean minerales indicativos de alteración hidrotermal, los cuales actúan como marcadores geológicos de zonas de interés.
- **Cartografía Geobotánica:** Los cambios en la vegetación, detectados mediante índices de vegetación, pueden ser señales indirectas de alteraciones en el subsuelo, como la presencia de calor o actividad hidrotermal.



Fotografía: Jaír Ramírez Cadena



CAPÍTULO 3

Cartografía de temperatura superficial



CAPÍTULO 3. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE

La temperatura de la superficie terrestre (LST, siglas en inglés de *Land Surface Temperature*) es un parámetro fundamental en los estudios geotérmicos, ya que proporciona información relevante sobre los flujos de calor y las interacciones térmicas en la superficie terrestre. Este indicador, obtenido a partir de mediciones en el espectro infrarrojo térmico, resulta especialmente útil para la identificación de anomalías térmicas asociadas a sistemas hidrotermales y zonas de actividad geotérmica.

En este contexto, los sensores remotos como *Landsat 8*, *Landsat 9* y *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)* se destacan como herramientas fundamentales para el análisis de la LST en áreas extensas y de difícil acceso, permitiendo una evaluación más precisa y eficiente de los recursos geotérmicos potenciales.

Los sensores térmicos de *Landsat 8* y *9 (Thermal Infrared Sensor, TIRS)* y *ASTER*, permiten medir la radiancia térmica emitida desde la superficie terrestre, facilitando una estimación precisa de la LST. Este proceso implica la conversión de la radiancia en valores de temperatura mediante algoritmos avanzados que consideran variables clave, como la emisividad del suelo y la cobertura vegetal, estimadas a través de índices como el *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*. Además, estos métodos incluyen correcciones atmosféricas y topográficas, lo que mejora significativamente la calidad de las estimaciones en áreas geotérmicamente activas.

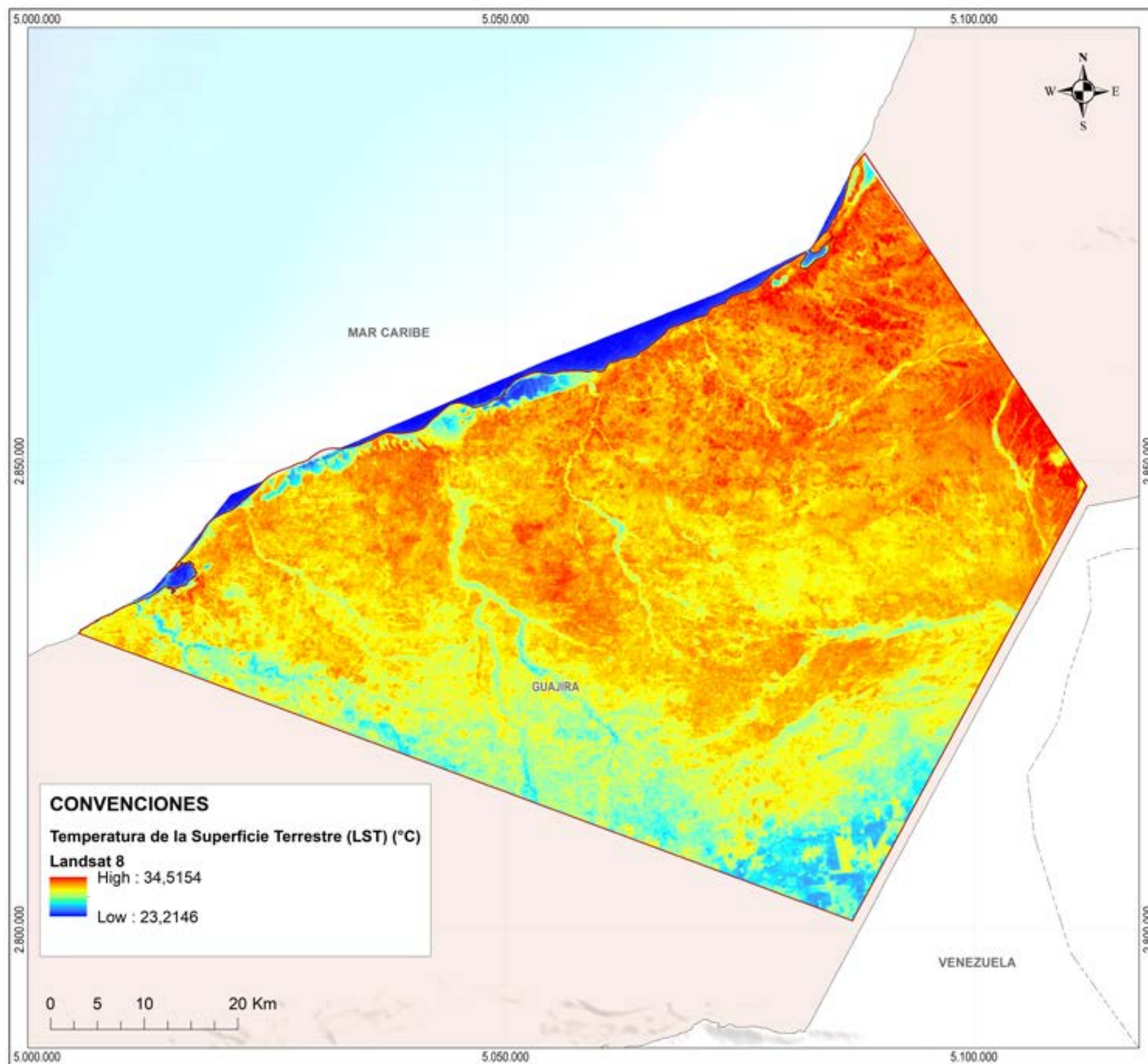
En el análisis de datos, *ASTER* fue utilizado para calcular la LST; sin embargo, los resultados no alcanzaron la calidad requerida,

especialmente en zonas de alta complejidad geotérmica. En contraste, *Landsat 8* y *9* demostraron una alta efectividad, generando resultados consistentes y confiables que destacan su utilidad en estudios de exploración geotérmica.

La integración de los datos LST obtenidos mediante estas tecnologías es esencial para la caracterización de sistemas geotérmicos, el mapeo de flujos de calor y la priorización de áreas con potencial para exploración energética. En Colombia, estos datos permiten identificar patrones térmicos en regiones volcánicas y evaluar el impacto de la actividad geotérmica en el entorno. Asimismo, contribuyen al monitoreo de cambios térmicos derivados de dinámicas naturales y humanas, fortaleciendo el desarrollo sostenible de los recursos geotérmicos en el país.



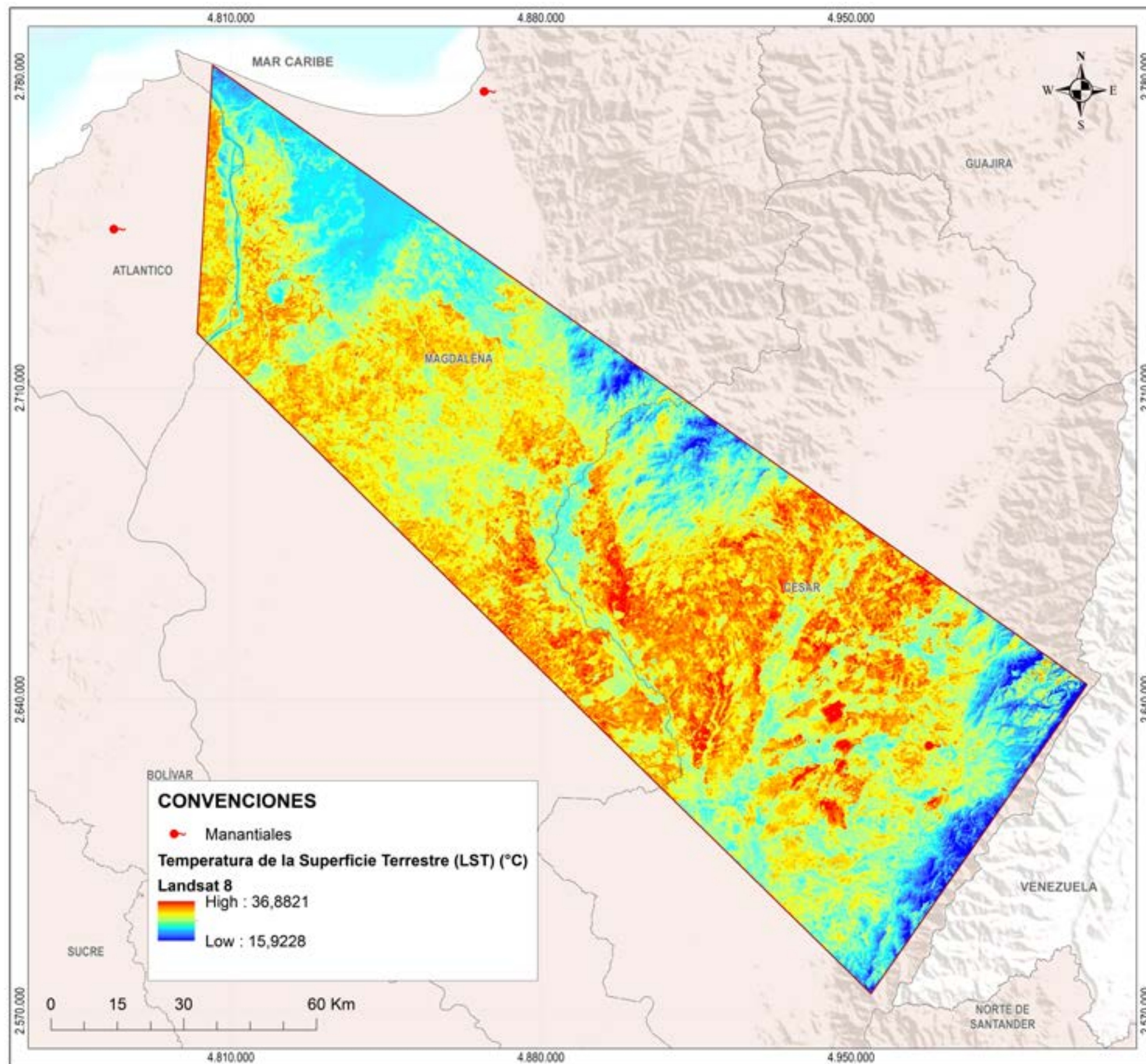
Fotografía: Jaír Ramírez Cadena



Bloque 1. Guajira

Ubicado en el extremo sur de la cuenca Guajira Onshore, en la península colombiana, este bloque registra una temperatura promedio de 28.7 °C, con valores máximos de 34.6 °C y mínimos de 22.8 °C.

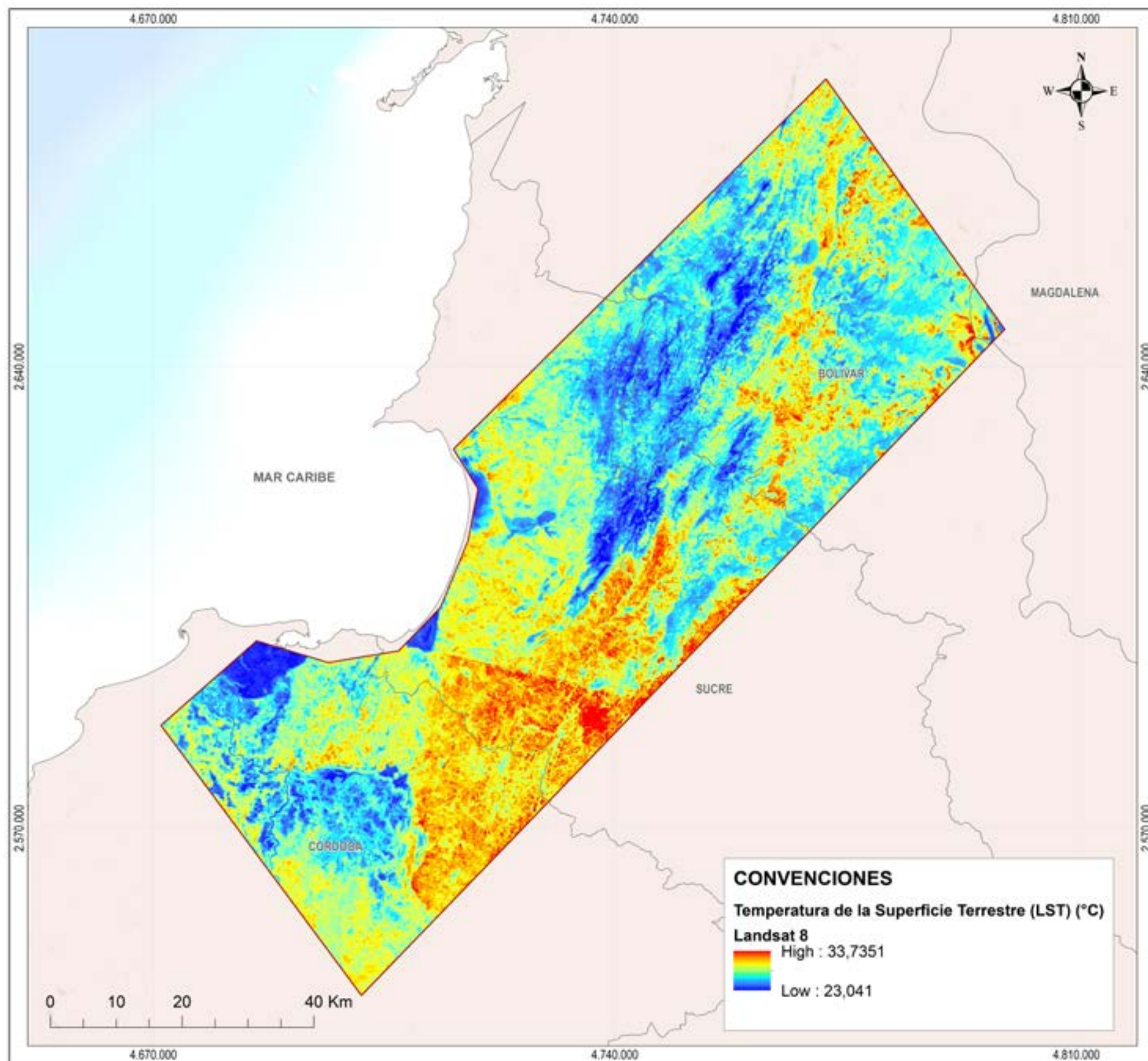
Figura 3.1. Distribución de la temperatura en la superficie terrestre (*Land Surface Temperature - LST*), imagen LANDSAT 8, Bloque 1, Guajira.



Bloque 2. VIM-Cesar

Este bloque está ubicado en el extremo norte de la cuenca Sinú-San Jacinto, el Valle Inferior del Magdalena y el extremo sur de la cuenca Cesar-Ranchería. Las temperaturas promedio son de 24.8 °C, con máximas de 36.2 °C y mínimas de 13.5 °C.

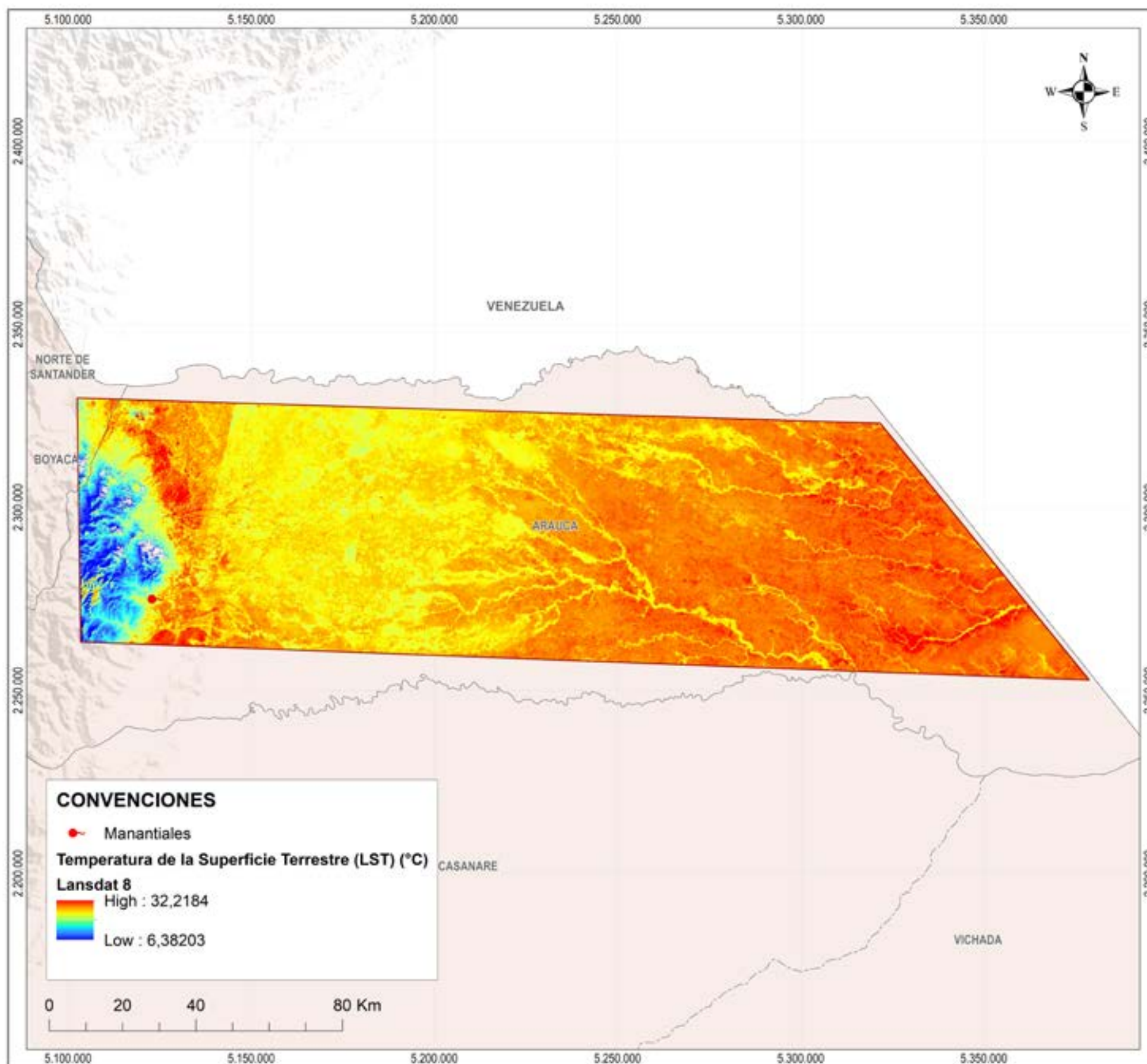
Figura 3.2. Distribución de la temperatura en la superficie terrestre (*Land Surface Temperature - LST*), imagen LANDSAT 8, Bloque 2, VIM-Cesar.



Bloque 3. Morrosquillo-Cansona

El bloque Morrosquillo-Cansona está ubicado principalmente dentro de la cuenca Sinú-San Jacinto; y, en su extremo noreste, se extiende hacia la cuenca Valle Inferior del Magdalena. Presenta una temperatura terrestre promedio de 27.4 °C, con valores máximos de 33.3°C y mínimos de 21.5 °C.

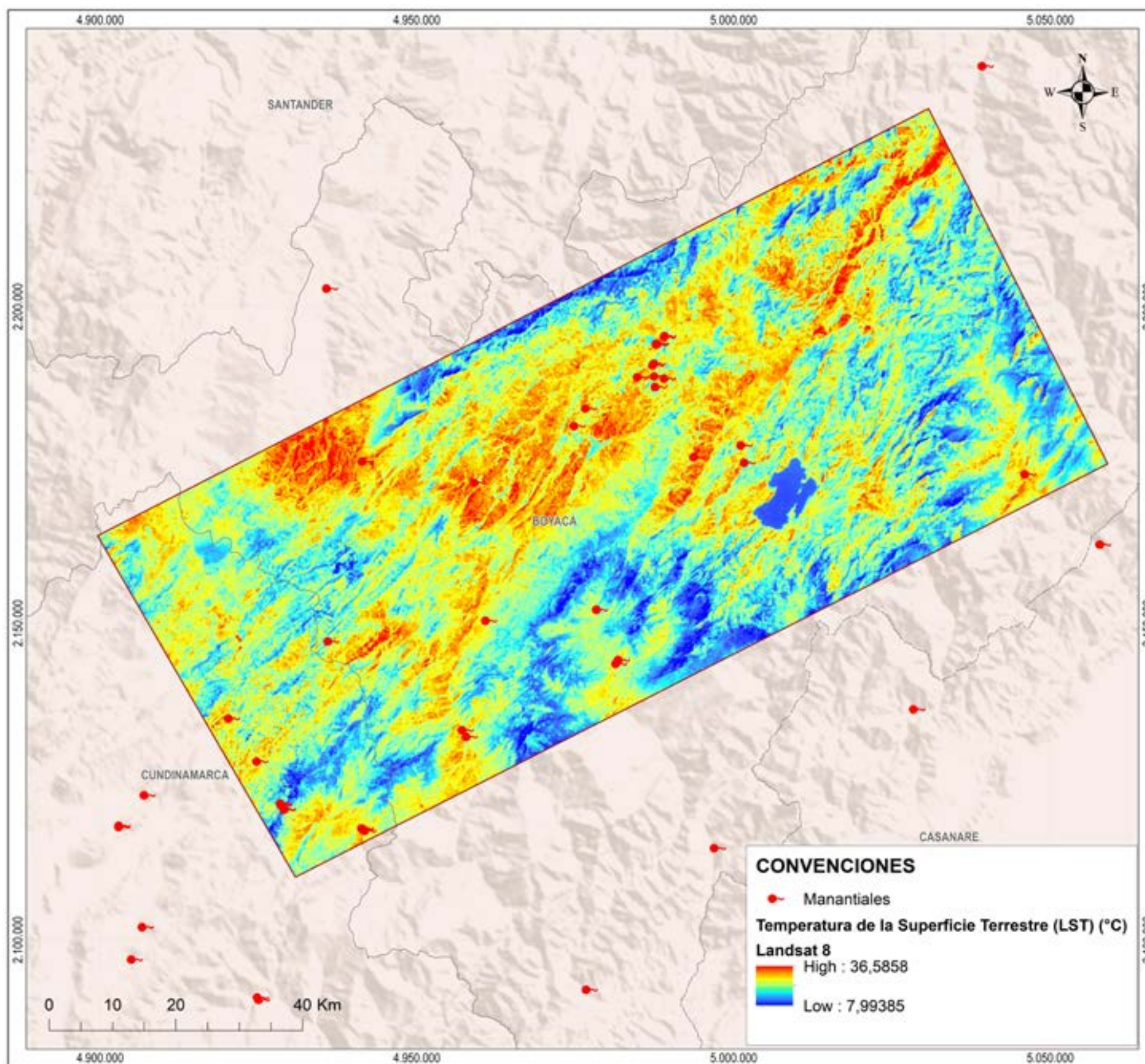
Figura 3.3. Distribución de la temperatura en la superficie terrestre (*Land Surface Temperature - LST*), imagen LANDSAT 8, Bloque 3, Morrosquillo-Cansona.



Bloque 4. Arauca

Este bloque, ubicado en el extremo norte de la cuenca Llanos, presenta temperaturas máximas de 31.1 °C, mínimas de 7.5 °C y un promedio de 11.8 °C.

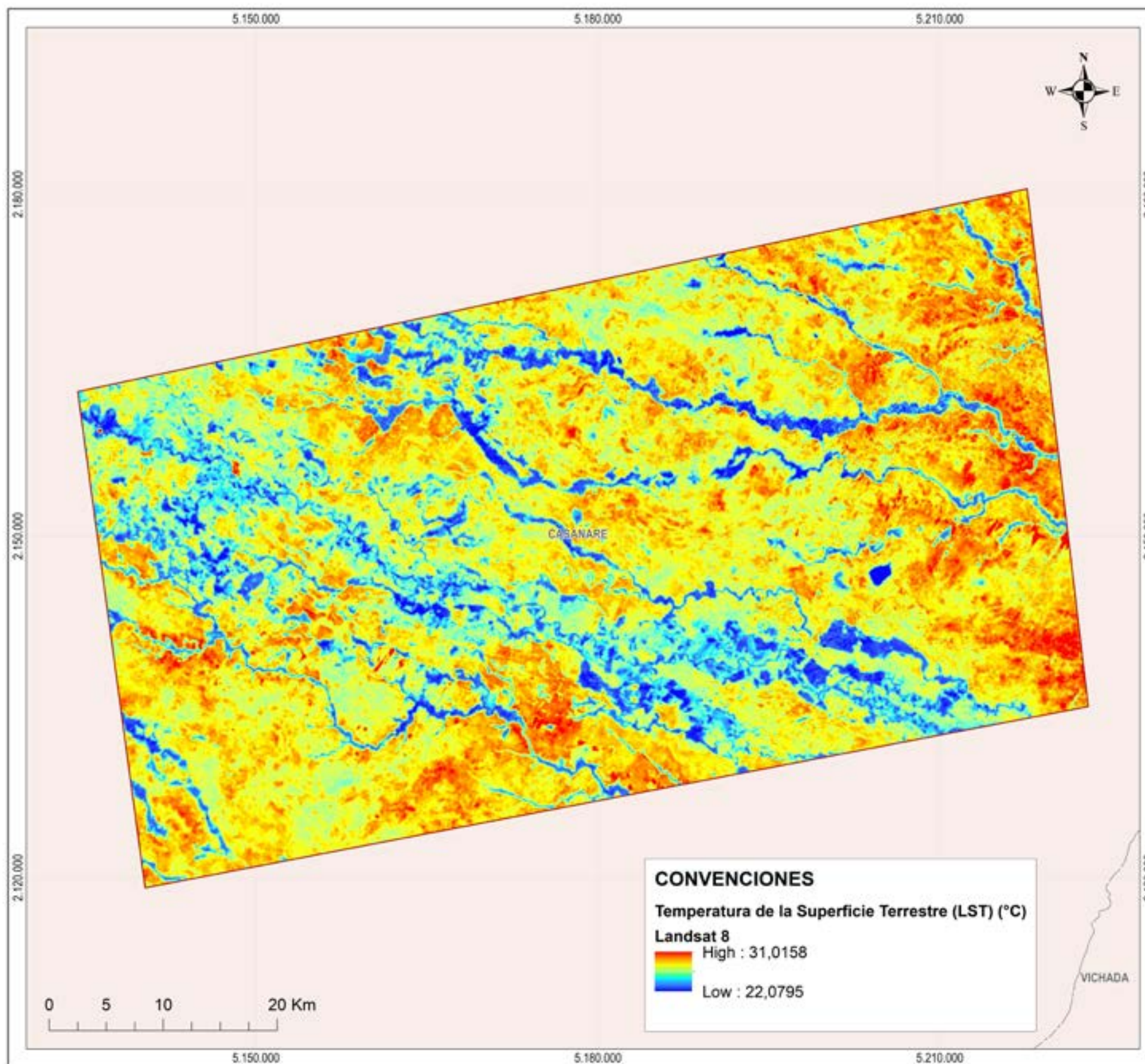
Figura 3.4. Distribución de la temperatura en la superficie terrestre (*Land Surface Temperature - LST*), imagen LANDSAT 8, Bloque 4, Arauca.



Bloque 5. Paipa-Samacá

En este bloque se encuentran las áreas geotérmicas de Paipa y Samacá, ubicadas en su sector central. Las temperaturas promedio son de 20.4 °C, con máximas de 36.7 °C y mínimas de 4.1 °C.

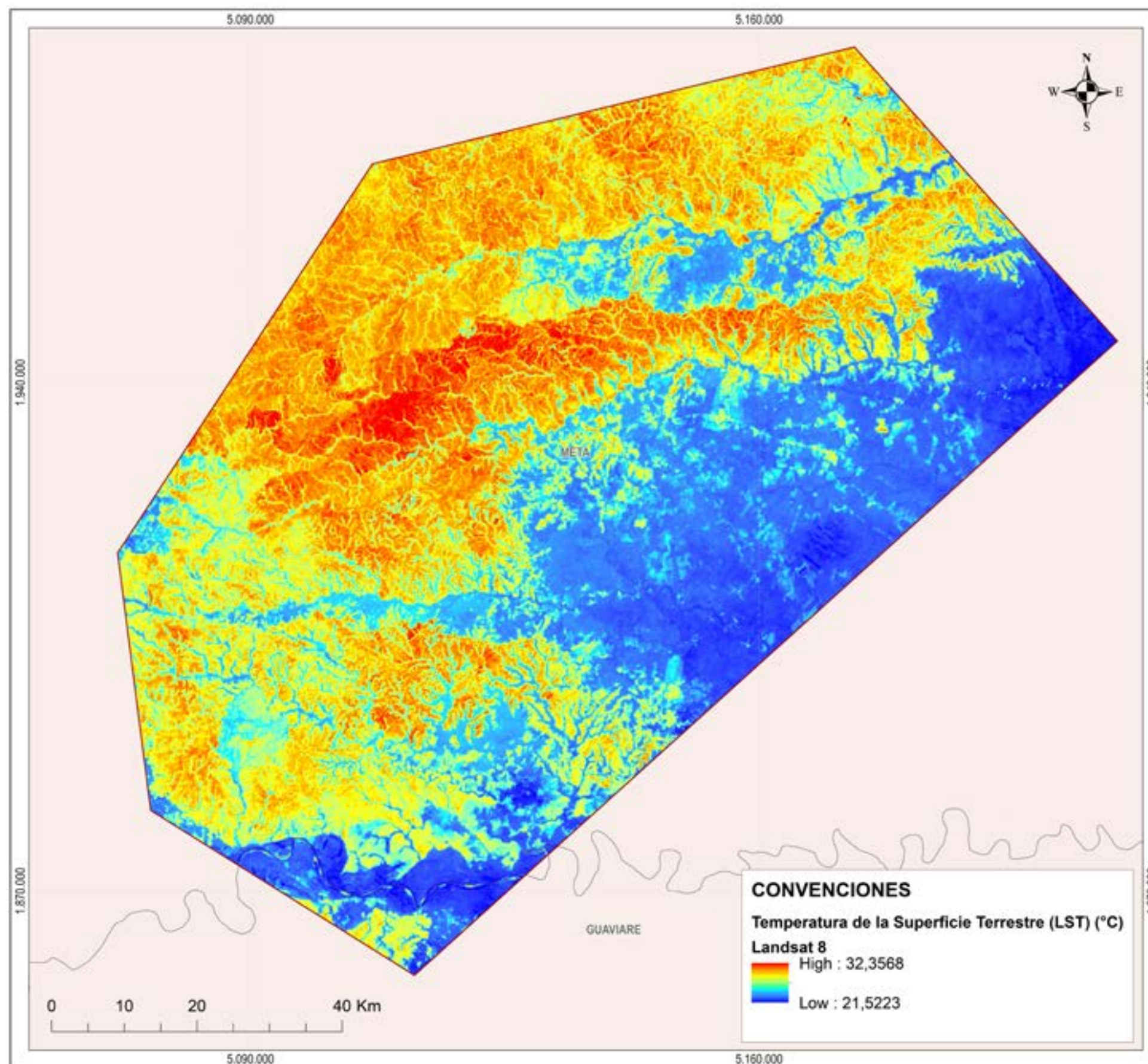
Figura 3.5. Distribución de la temperatura en la superficie terrestre (*Land Surface Temperature - LST*), imagen LANDSAT 8, Bloque 5, Paipa-Samacá.



Bloque 6. Trinidad

Localizado en el sector central de la cuenca Llanos Orientales, el bloque Trinidad presenta una temperatura promedio de 26°C, con máximas de 30.1°C y mínimas de 21.9 °C.

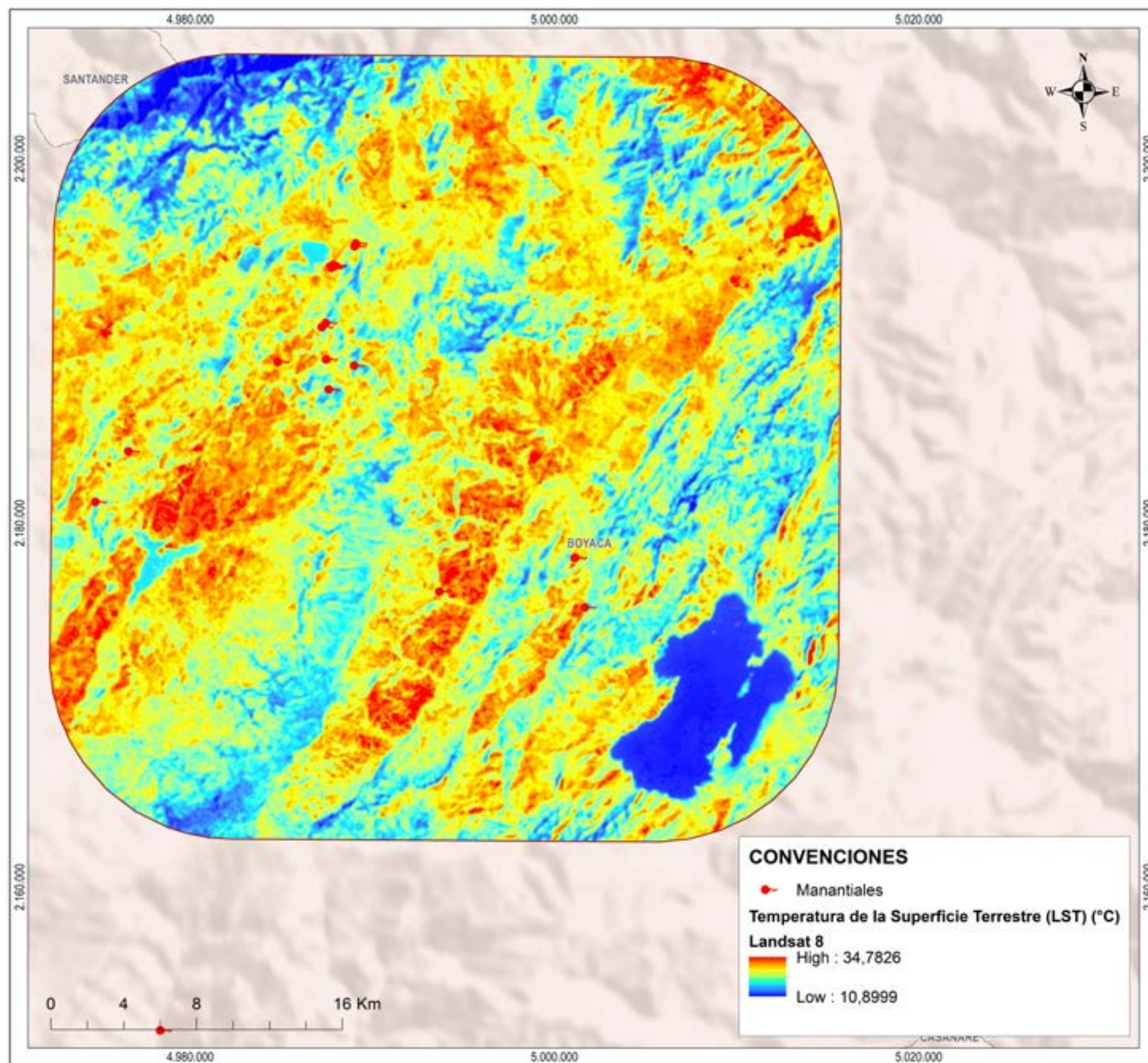
Figura 3.6. Distribución de la temperatura en la superficie terrestre (*Land Surface Temperature - LST*), imagen LANDSAT 8, Bloque 6, Trinidad.



Bloque 7. Llanos

El bloque Llanos, situado en el sector centro-norte de la cuenca Llanos Orientales, presenta una temperatura promedio de 26.1 °C, con máximas de 31.2 °C y mínimas de 13.5 °C.

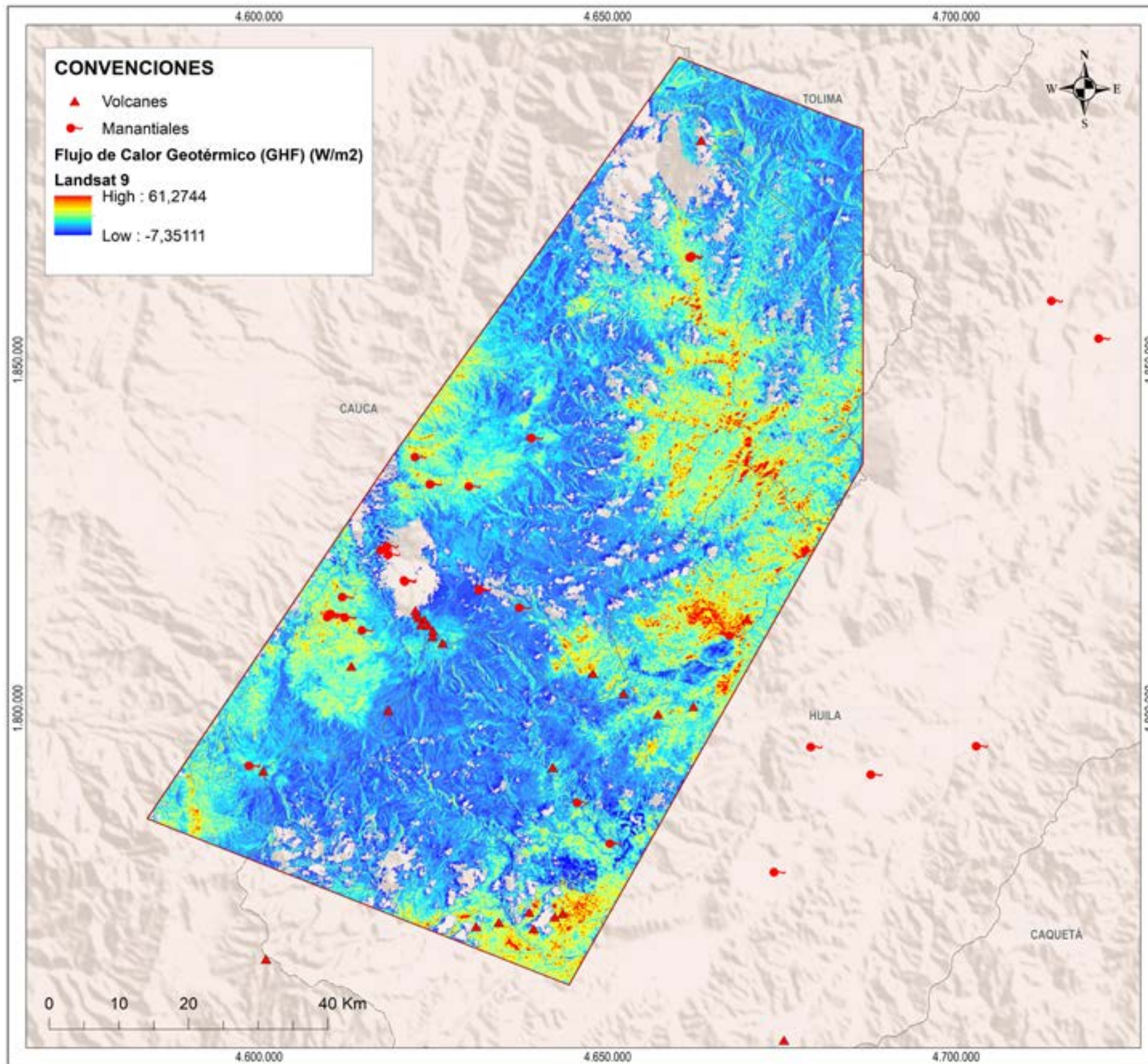
Figura 3.7. Distribución de la temperatura en la superficie terrestre (Land Surface Temperature - LST), imagen LANDSAT 8, Bloque 7, Llanos.



Bloque 8. CO-Paipa-Iza

El bloque Paipa-Iza incluye áreas geotérmicas como Paipa-Iza, el volcán de Paipa (que incluye el Alto Los Godos y el Alto Los Volcanes) y el domo de Iza. Este bloque registra una temperatura promedio de 22.9 °C, con máximas de 34.9 °C y mínimas de 10.8 °C.

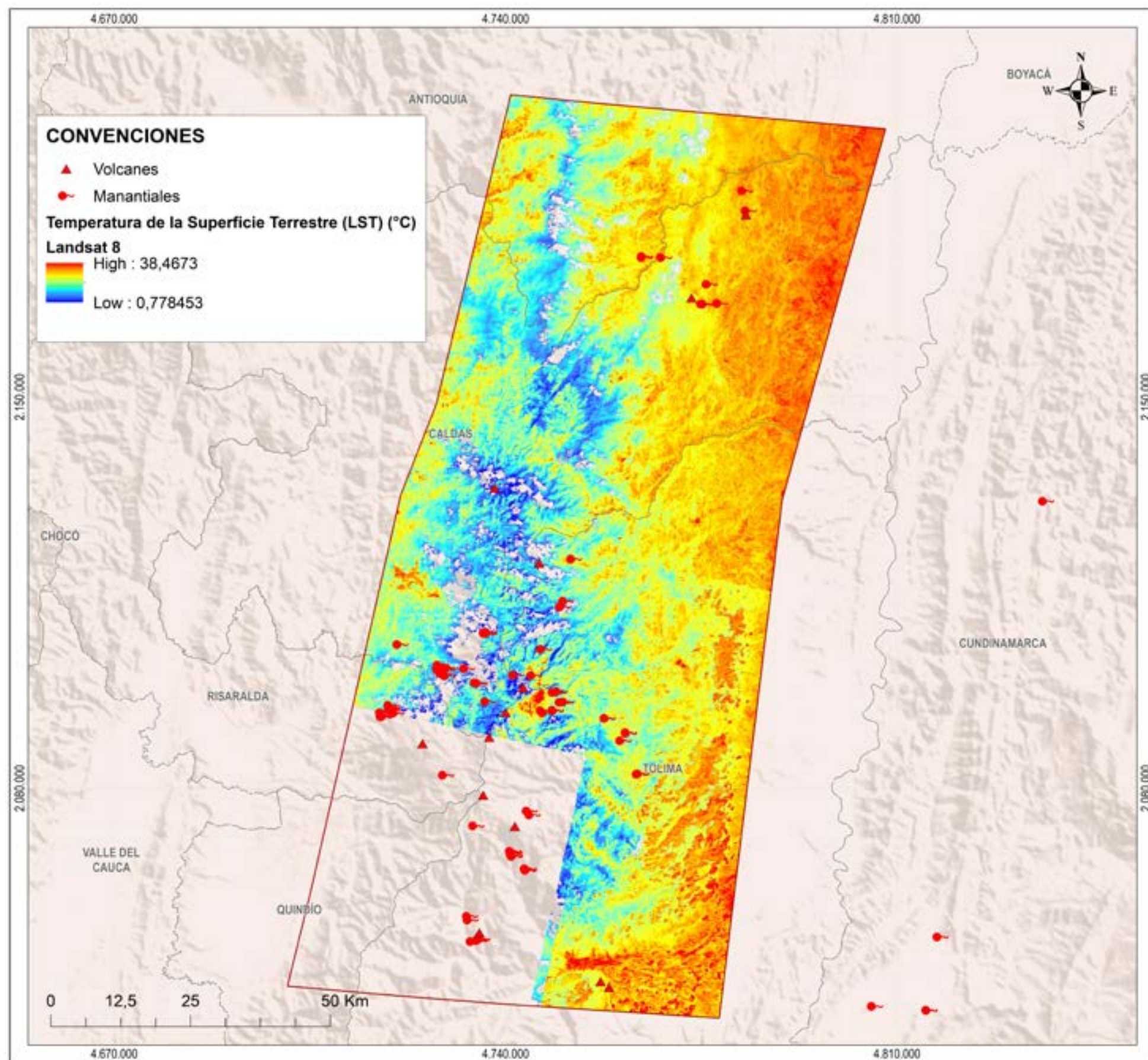
Figura 3.8. Distribución de la temperatura en la superficie terrestre (*Land Surface Temperature - LST*), imagen LANDSAT 8, Bloque 8, CO-Paipa-Iza.



Bloque 9. CC-Centro

En este bloque, las temperaturas oscilan entre un máximo de 35.6 °C y un mínimo de -20.1 °C, con un promedio de 7.7 °C. La región incluye importantes áreas geotérmicas que se extienden en dirección sureste-noreste, destacando la presencia de los volcanes Sotará y Sucubún, la caldera de Paletará, la caldera Gabriel López y el volcán Nevado del Huila.

Figura 3.9. Distribución de la temperatura en la superficie terrestre (*Land Surface Temperature - LST*), imagen LANDSAT8, Bloque 9, CC-Centro.



Bloque 10. CC-Norte

Las temperaturas en este bloque varían entre un máximo de 34.8 °C, un mínimo de -1.2 °C y un promedio de 16.8 °C. Esta región alberga zonas geotérmicas significativas, dispuestas en dirección norte-sur, que incluyen los volcanes San Diego, Cerro Bravo, la zona Villamaría-Termas, Nereidas-Botero Londoño, Hacienda Granates, el volcán Santa Rosa, el Nevado del Tolima y el volcán Cerro Machín.

Figura 3.10. Distribución de la temperatura en la superficie terrestre (*Land Surface Temperature - LST*), imagen LANDSAT 8, Bloque 10, CC-Norte.

The background features a solid yellow color with a series of thin, light-yellow concentric circles and a horizontal line that intersect to form a grid-like pattern of circular segments.

CAPÍTULO 4

Flujo de calor geotérmico



CAPÍTULO 4. FLUJO DE CALOR GEOTÉRMICO

El Flujo de Calor Geotérmico (*GHF*, por sus siglas en inglés) es un parámetro clave en la caracterización de recursos geotérmicos, ya que permite identificar anomalías térmicas asociadas a la actividad tectónica, volcánica y procesos hidrotermales. Este flujo representa el calor emitido desde el interior de la tierra hacia la superficie terrestre y se mide en vatios por metro cuadrado (W/m^2). Cabe destacar que esta medición excluye las contribuciones de fuentes externas, como la radiación solar directa o indirecta. En este estudio, se utilizaron las tecnologías de teledetección Landsat 8, Landsat 9 y ASTER, herramientas que han demostrado ser fundamentales para el análisis y mapeo del GHF en áreas extensas y de difícil acceso, facilitando la identificación de zonas con potencial geotérmico.

Los sensores térmicos a bordo de Landsat 8 y 9, TIRS y ASTER capturan datos en el espectro infrarrojo térmico, lo que permite medir la emisión de energía térmica desde la superficie terrestre y distinguir las contribuciones geotérmicas del calor originado por radiación solar.

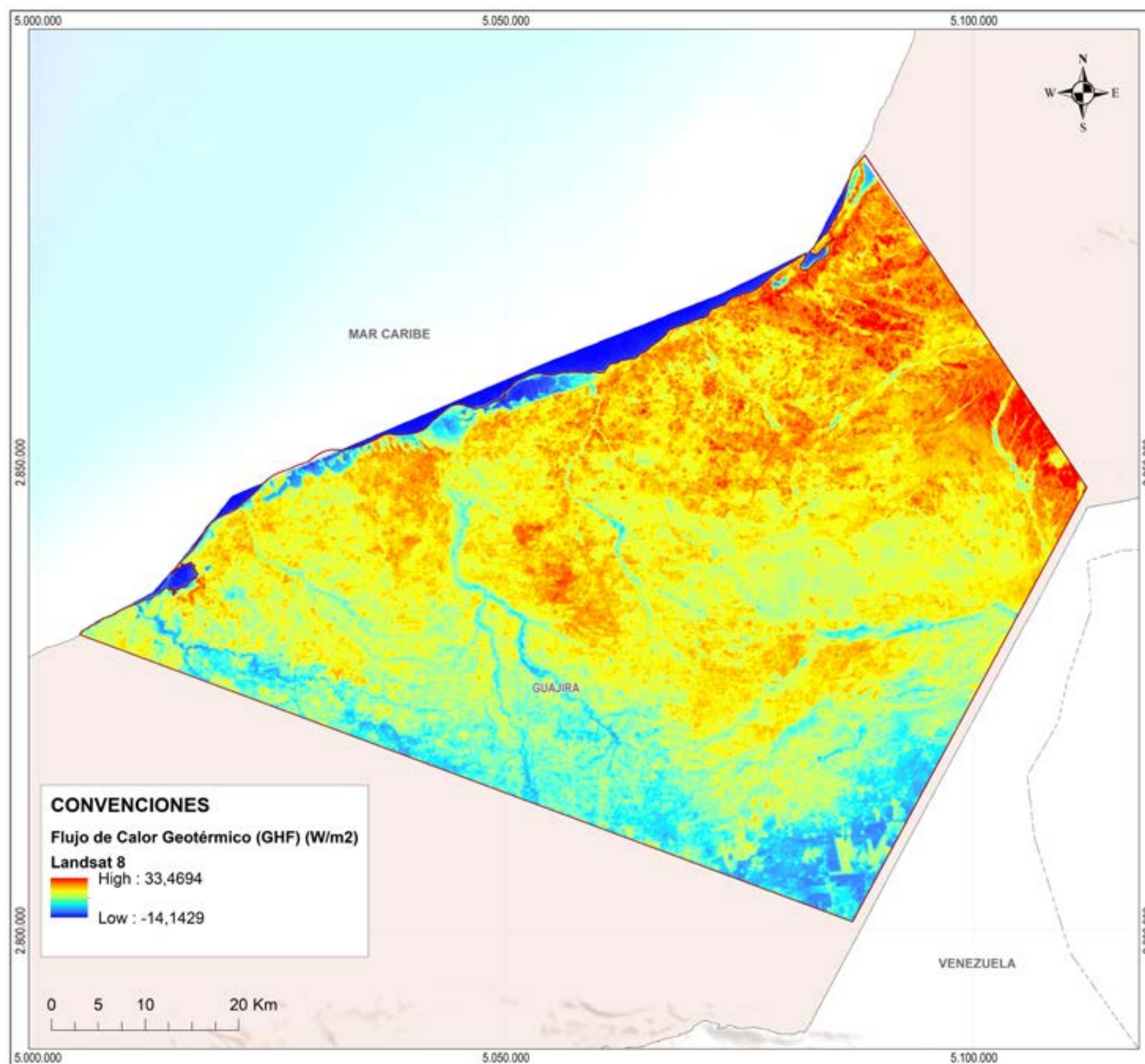
Estos datos son procesados para calcular la radiancia espectral y convertirla en temperaturas superficiales mediante algoritmos avanzados. Las técnicas integran variables como la emisividad del suelo y la cobertura vegetal, las cuales son estimadas a través de índices como el *Normalized Difference Vegetation Index-NDVI*. Además, los métodos incluyen correcciones de efectos atmosféricos y topográficos, asegurando una mayor precisión en la estimación del GHF.

Aunque se utilizó el sensor ASTER en el procesamiento, los resultados no alcanzaron la precisión deseada debido a las limitaciones para estimar temperaturas en áreas geotérmicamente complejas. Por el contrario, Landsat 8 y 9 ofrecieron resultados consistentes y de alta calidad, destacándose por su capacidad para identificar patrones claros de flujo de calor y delimitar zonas de alta actividad geotérmica.

Las metodologías empleadas no solo permiten mapear patrones de flujo de calor, sino también delimitar áreas con alta actividad geotérmica asociadas a fenómenos volcánicos o tectónicos. En Colombia, estas tecnologías son esenciales para priorizar áreas de exploración energética, contribuir a la gestión sostenible de los recursos naturales y monitorear el impacto ambiental. Además, fortalecen el conocimiento sobre los sistemas geotérmicos del país, facilitando iniciativas orientadas a la generación de energía renovable y sostenible.



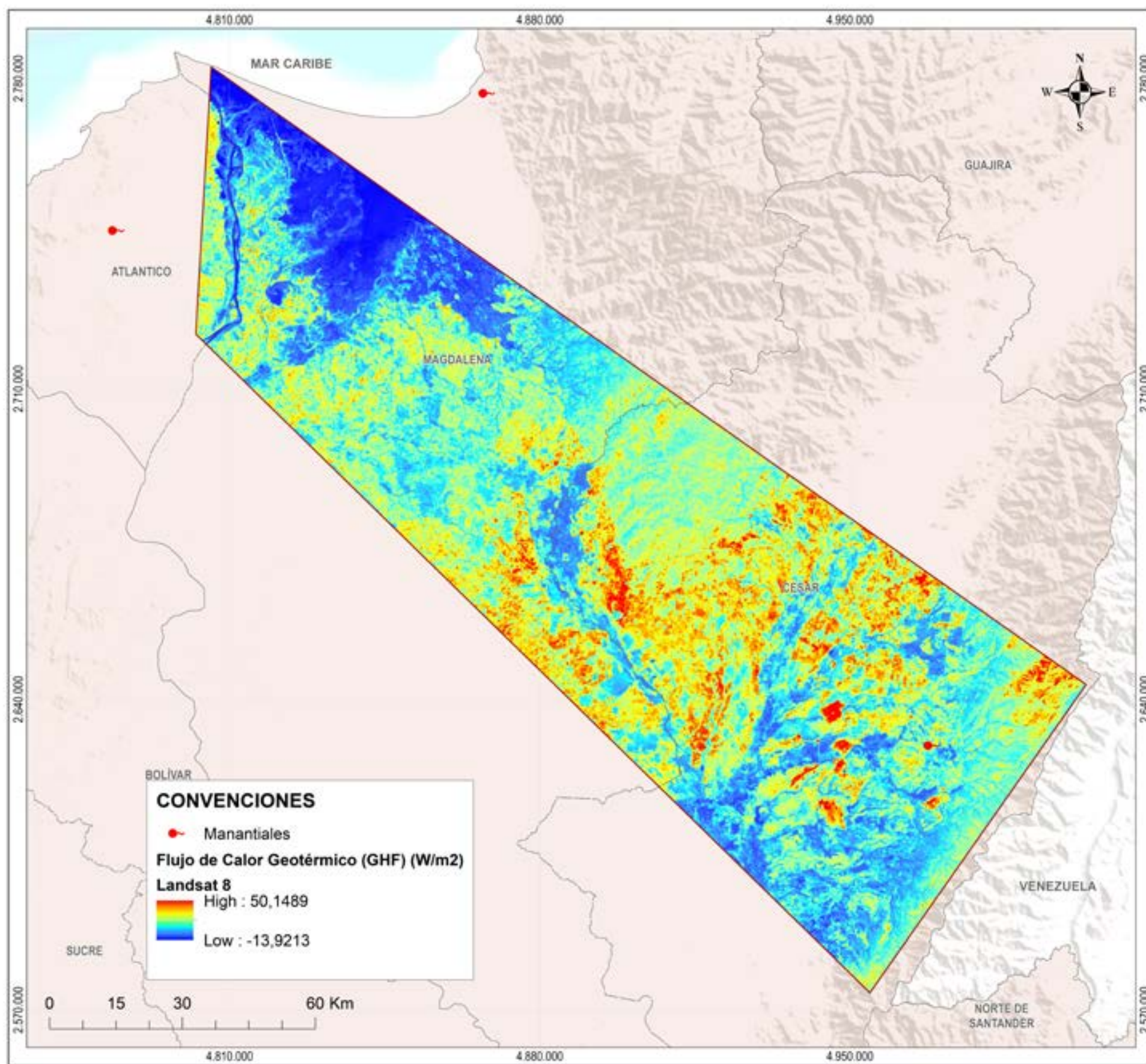
Fotografía: Jaír Ramírez Cadena



Bloque 1. Guajira

El bloque Guajira se encuentra en el extremo sur de la cuenca Guajira Onshore y presenta un flujo de calor geotérmico promedio de 8.7 W/m², con valores máximos de 32.3 W/m² y mínimos de -14.9 W/m².

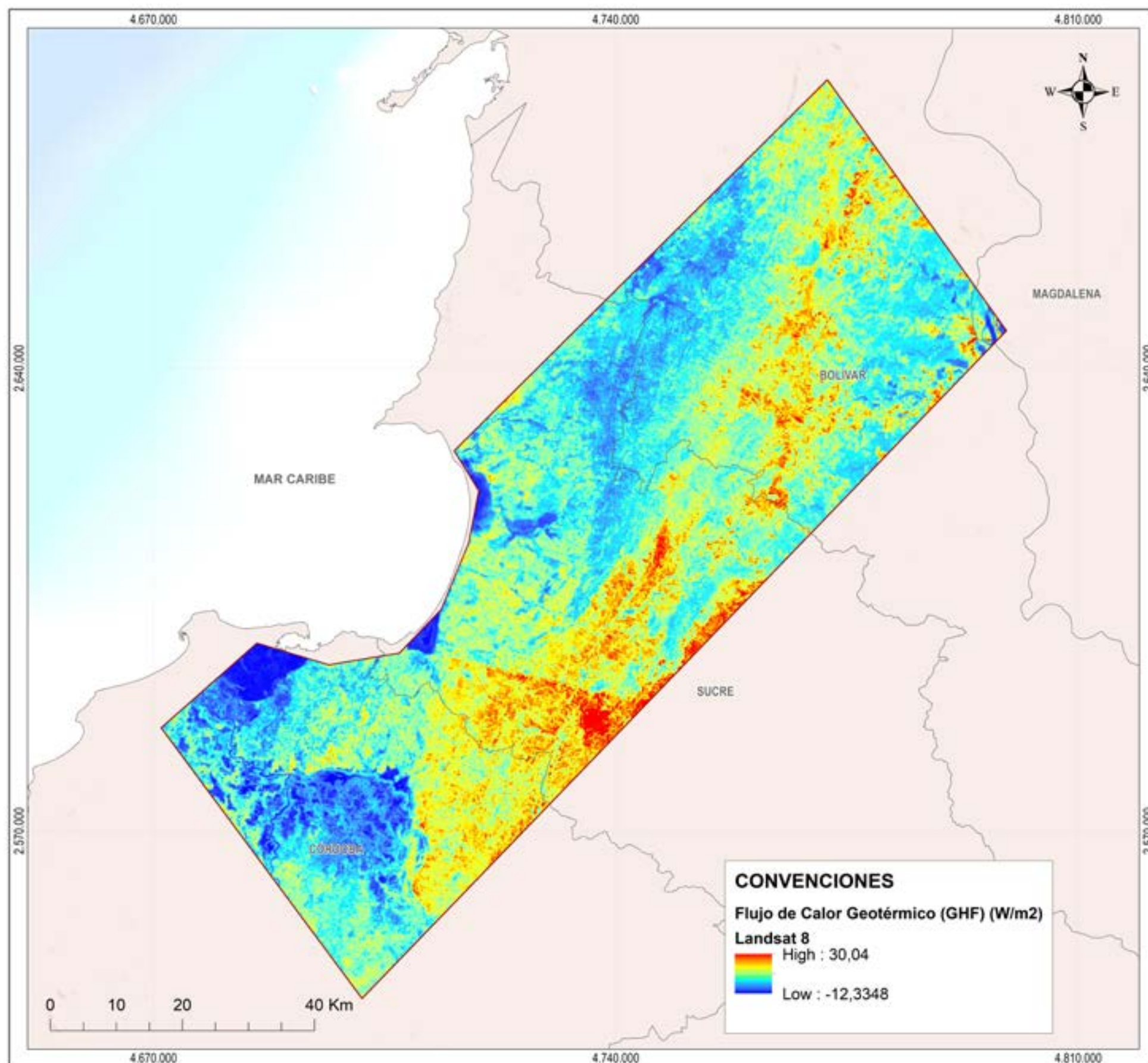
Figura 4.1. Distribución del flujo de calor geotérmico en la superficie terrestre (Geothermal Heat Flux - GHF), Bloque 1, Guajira.



Bloque 2. VIM-Cesar

El bloque VIM-Cesar se encuentra en el extremo norte de la cuenca Sinú - San Jacinto, el Valle Inferior del Magdalena y en el extremo sur de la cuenca Cesar-Ranchería. Este bloque presenta un flujo de calor geotérmico promedio de 15.1 W/m^2 , con valores máximos de 44.5 W/m^2 y mínimos de -14.3 W/m^2 .

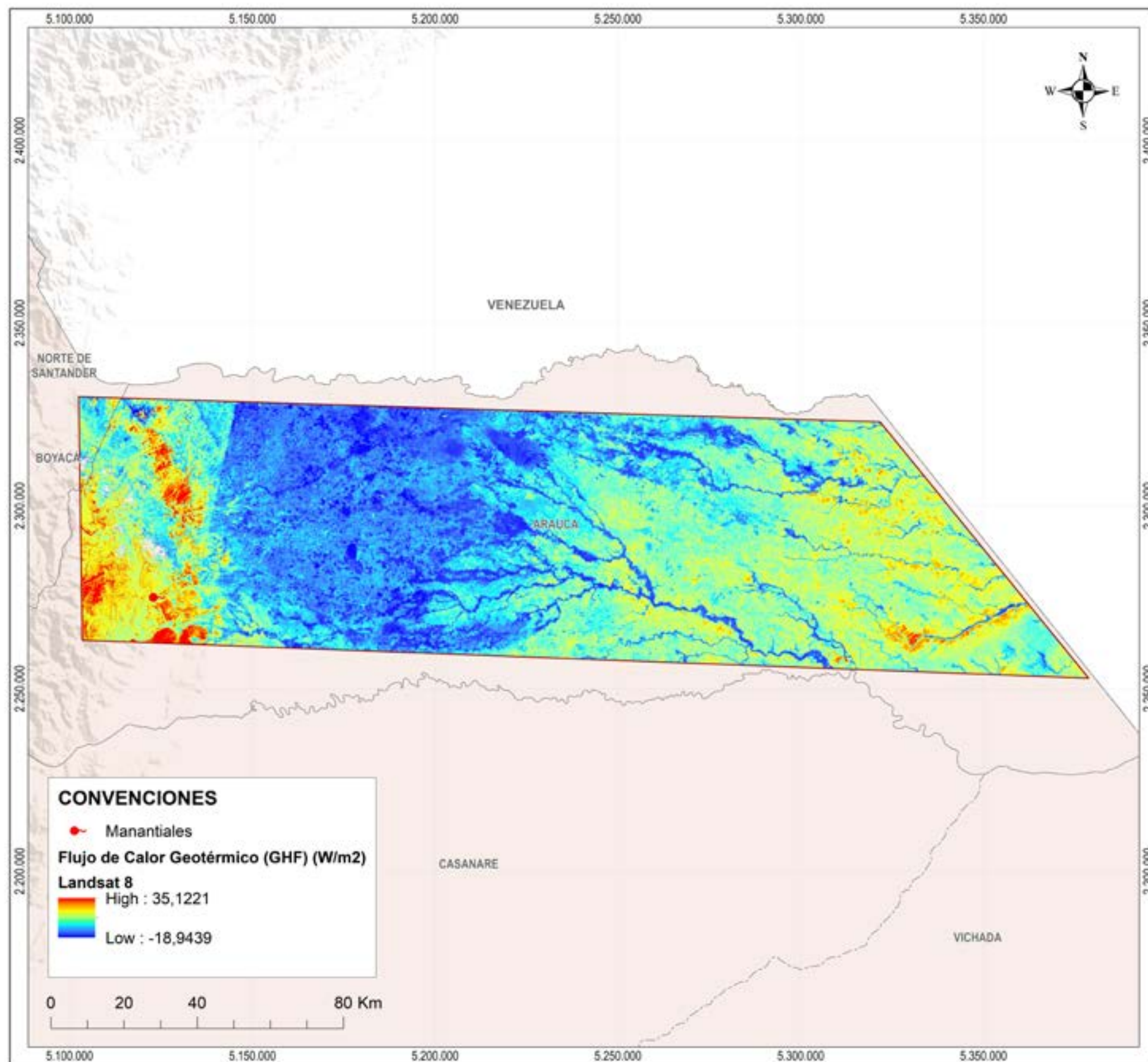
Figura 4.2. Distribución del flujo de calor geotérmico en la superficie terrestre (Geothermal Heat Flux - GHF), Bloque 2, VIM-Cesar.



Bloque 3. Morrosquillo-Cansona

El bloque Morrosquillo-Cansona se localiza principalmente dentro de la cuenca Sinú-San Jacinto, y en su extremo noreste, en la cuenca Valle Inferior del Magdalena. Presenta un flujo de calor geotérmico promedio de 6.8 W/m², con valores máximos de 26.6 W/m² y mínimos de -13.1 W/m².

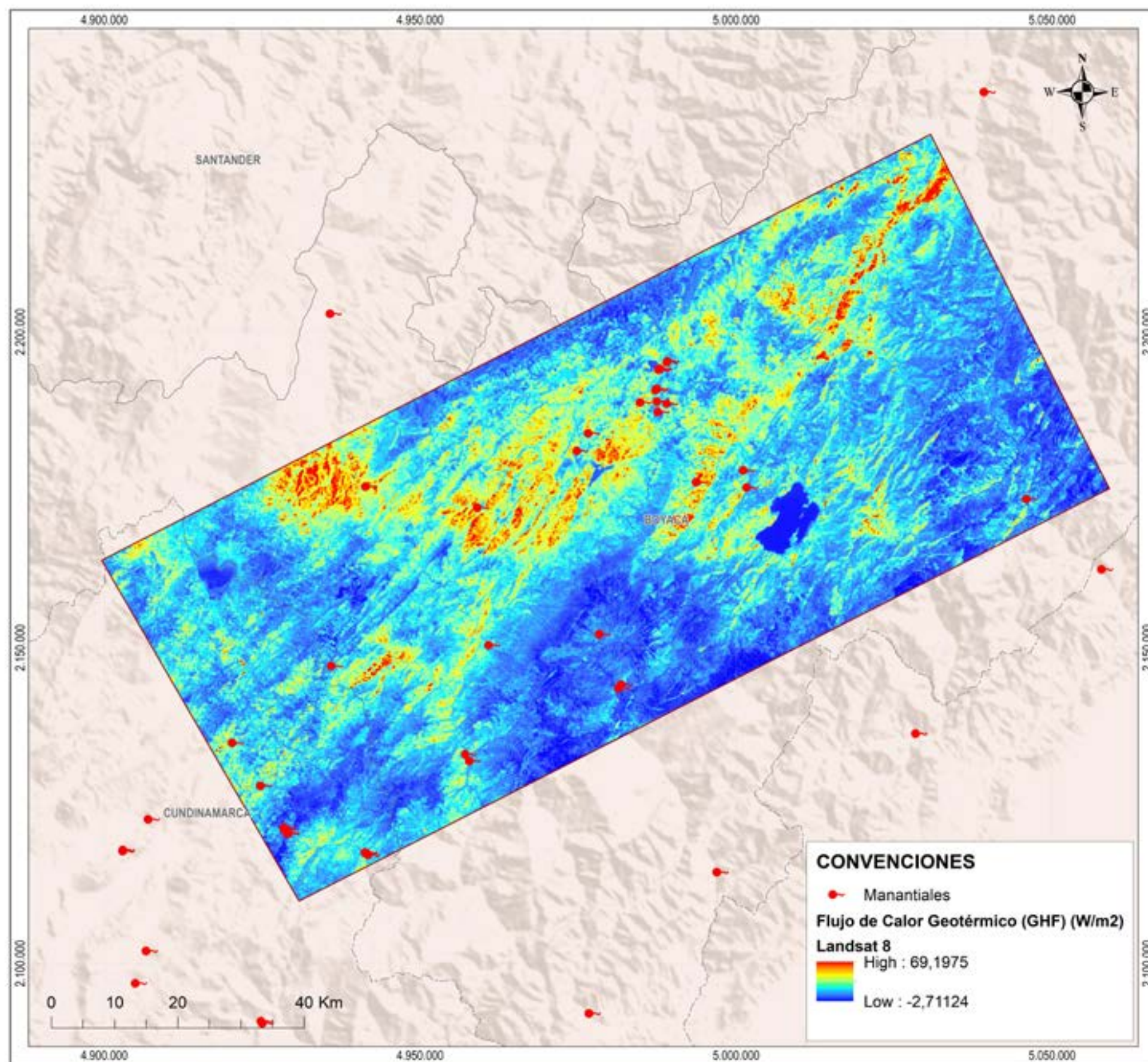
Figura 4.3. Distribución del flujo de calor geotérmico en la superficie terrestre (Geothermal Heat Flux - GHF), Bloque 3, Morrosquillo-Cansona.



Bloque 4. Arauca

El bloque Arauca está ubicado en el extremo norte de la cuenca Llanos Orientales y presenta un flujo de calor geotérmico promedio de 3.3 W/m^2 , con valores máximos de 24.7 W/m^2 y mínimos de -18.1 W/m^2 .

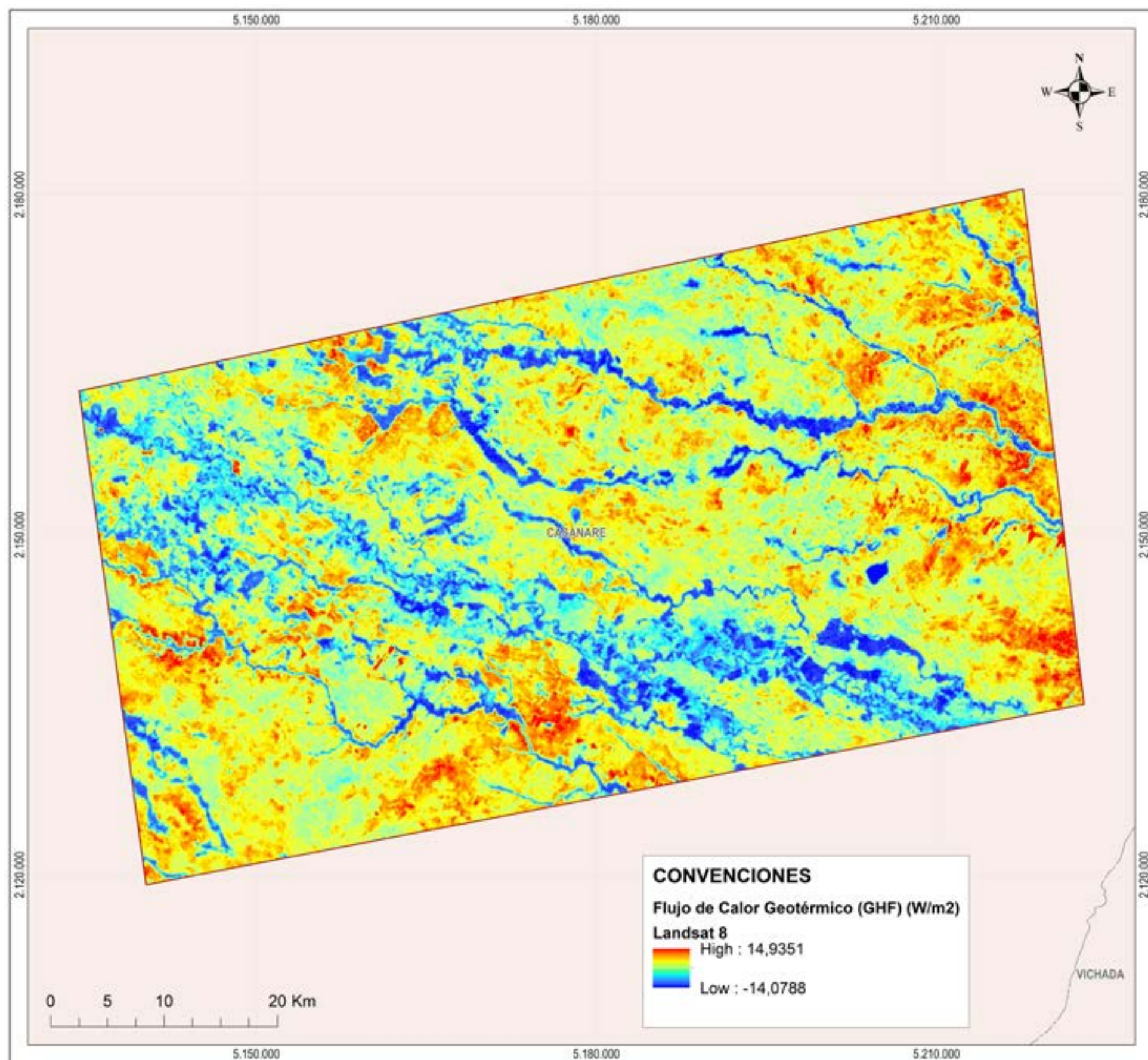
Figura 4.4. Distribución del flujo de calor geotérmico en la superficie terrestre (Geothermal Heat Flux - GHF), Bloque 4, Arauca.



Bloque 5. Paipa-Samacá

El bloque Paipa-Samacá presenta un flujo de calor geotérmico promedio de 32.5 W/m², con valores máximos de 69.8 W/m² y mínimos de -4.9 W/m². En su sector central se localizan las áreas geotérmicas de Paipa y Samacá.

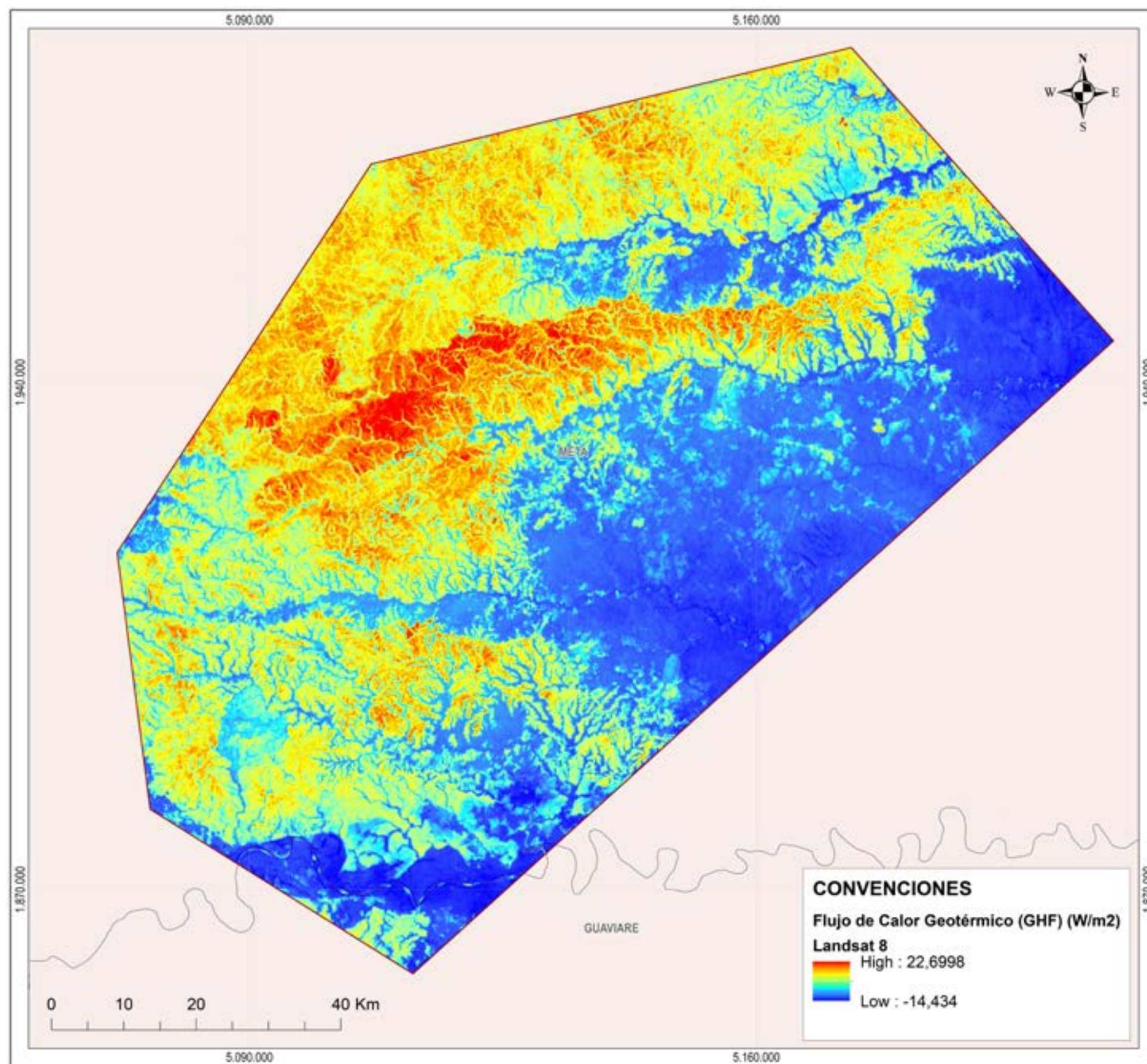
Figura 4.5. Distribución del flujo de calor geotérmico en la superficie terrestre (Geothermal Heat Flux - GHF), Bloque 5, Paipa-Samacá.



Bloque 6. Trinidad

Este bloque se encuentra en el sector central de la cuenca Llanos Orientales y presenta un flujo de calor geotérmico promedio de -1.9 W/m^2 , con valores máximos de 10.9 W/m^2 y mínimos de -14.7 W/m^2 .

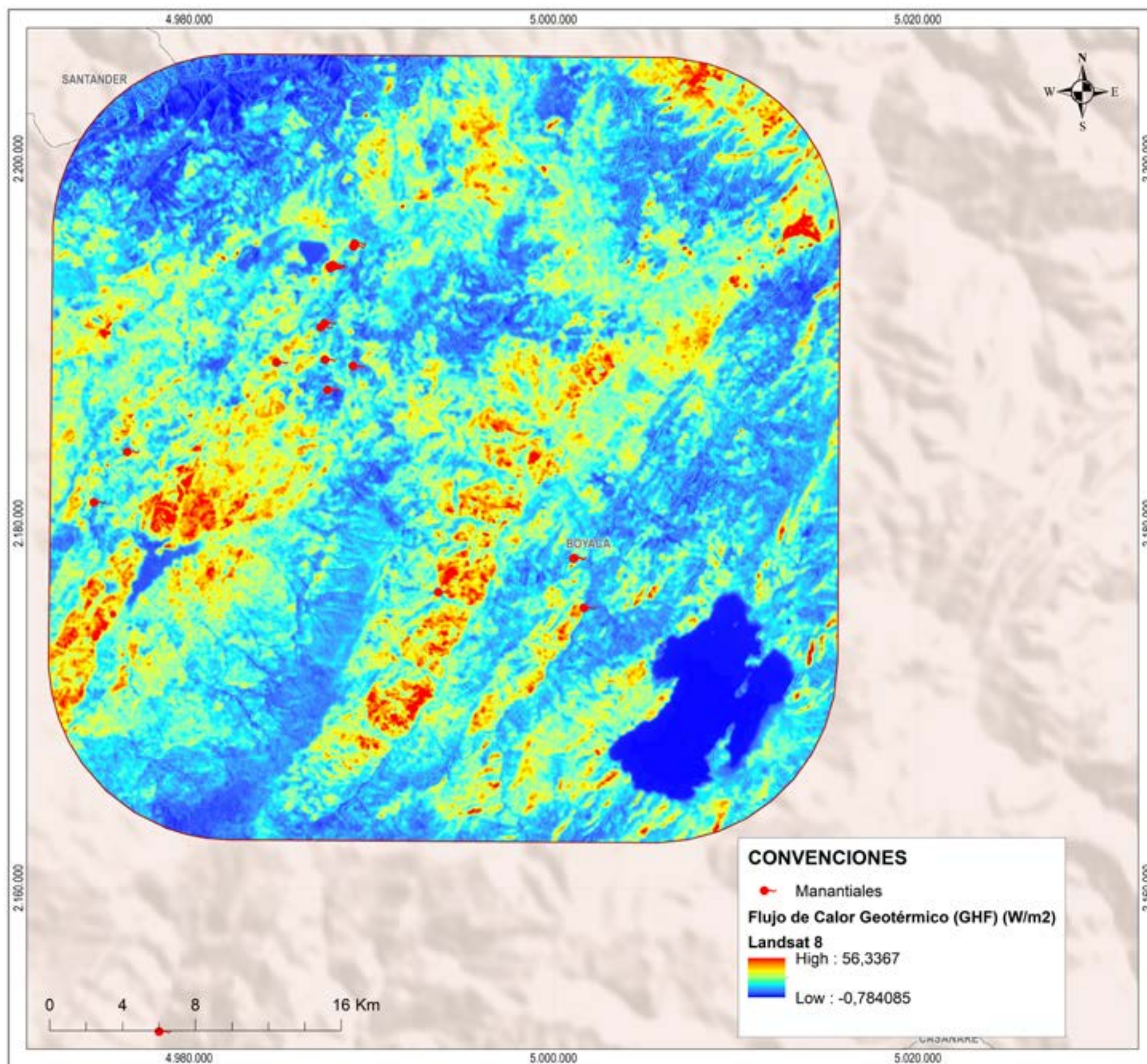
Figura 4.6. Distribución del flujo de calor geotérmico en la superficie terrestre (Geothermal Heat Flux - GHF), Bloque 6, Trinidad.



Bloque 7. Llanos

El bloque Llanos está ubicado en el sector centro-norte de la cuenca Llanos Orientales en Colombia. En este sector, se registra una temperatura promedio de 26.1°C, con valores máximos de 31.2°C y mínimos de 13.5°C.

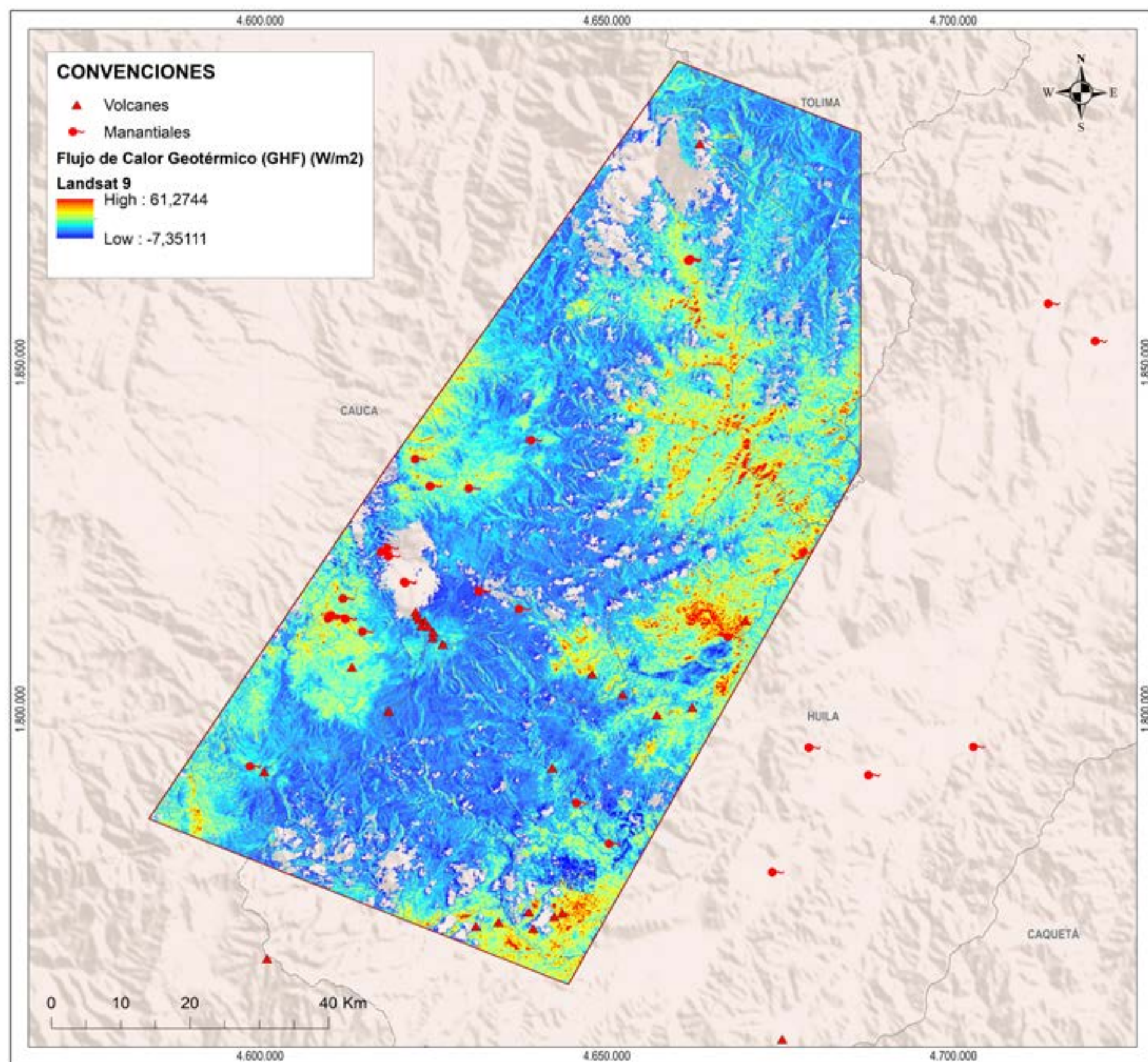
Figura 4.7. Distribución del flujo de calor geotérmico en la superficie terrestre (Geothermal Heat Flux - GHF), Bloque 7, Llanos.



Bloque 8. CO-Paipa-Iza

El bloque Paipa-Iza presenta un flujo de calor geotérmico promedio de 27.7 W/m², con valores máximos de 56.9 W/m² y mínimos de -1.5 W/m². En este bloque se encuentran el área geotérmica de Paipa-Iza, el volcán de Paipa (incluyendo el Alto Los Godos y Alto Los Volcanes) así como el domo de Iza.

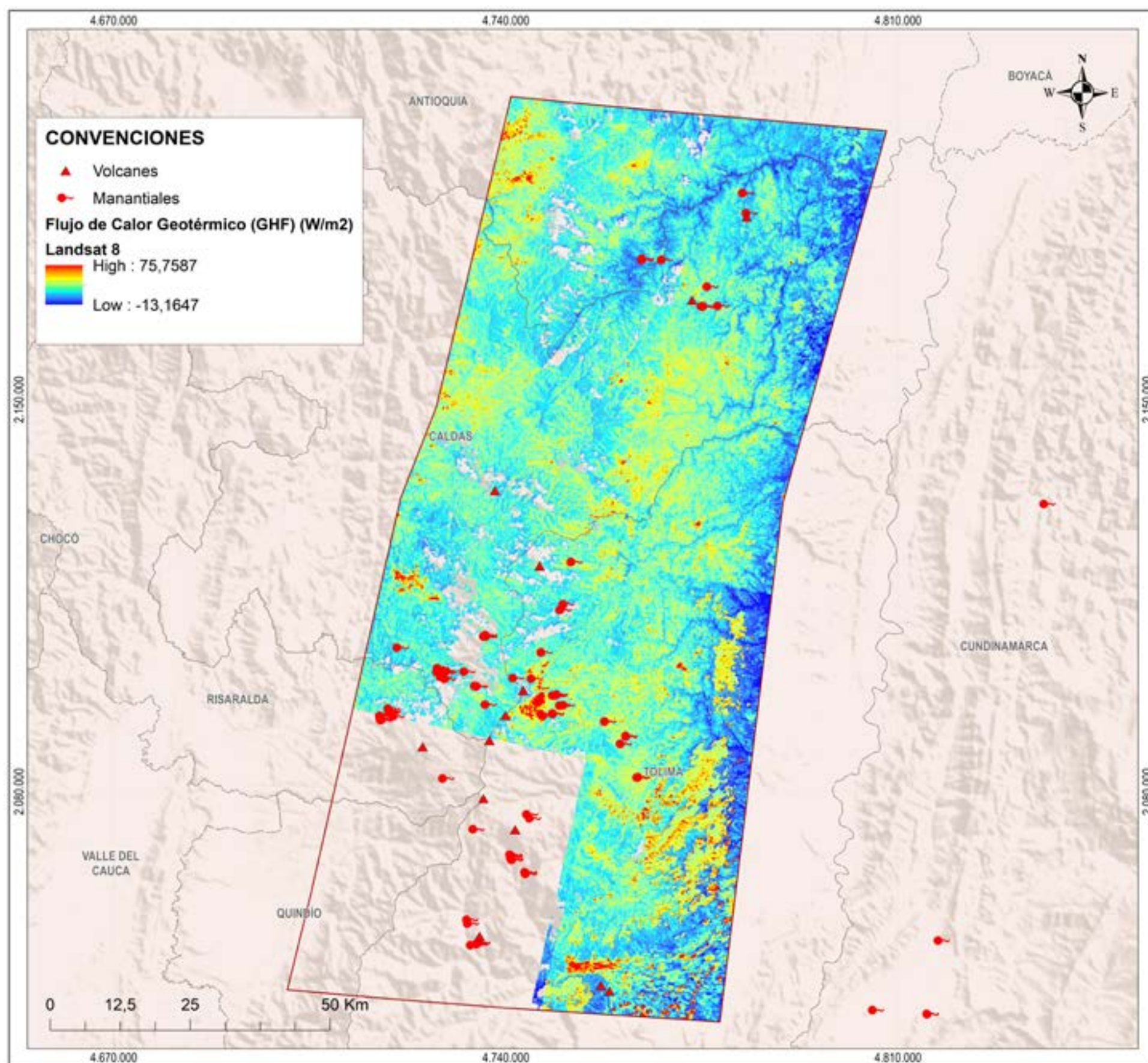
Figura 4.8. Distribución del flujo de calor geotérmico en la superficie terrestre (Geothermal Heat Flux - GHF), Bloque 8, CO-Paipa-Iza.



Bloque 9. CC-Centro

En el bloque CC-Centro, el flujo de calor geotérmico promedio es de 27.7 W/m^2 , con valores máximos de 61.7 W/m^2 y mínimos de -18.1 W/m^2 . Este sector alberga importantes áreas geotérmicas, incluyendo los volcanes Sotará y Sucubún, la caldera de Paletará, la caldera Gabriel López y el volcán Nevado del Huila, que se distribuyen en una dirección sureste-noreste.

Figura 3.9. Distribución del flujo de calor geotérmico en la superficie terrestre (Geothermal Heat Flux - GHF), Bloque 9, CC-Centro.



Bloque 10. CC-Norte

En esta región, el flujo de calor geotérmico registrado varía entre un valor máximo de 55.5 W/m², un mínimo de -15.1 W/m² y un promedio de 20.2 W/m². El sector incluye varias áreas geotérmicas destacadas, dispuestas en dirección norte-sur, como los volcanes San Diego, Cerro Bravo, la zona Villamaría-Termale, Nereidas-Botero Londoño, Hacienda Granates, el volcán Santa Rosa, el Nevado del Tolima y el volcán Cerro Machín.

Figura 4.10. Distribución del flujo de calor geotérmico en la superficie terrestre (Geothermal Heat Flux - GHF), Bloque 10, CC-Norte.

CAPÍTULO 5

Alteraciones hidrotermales y cartografía
mineral



CAPÍTULO 5. ALTERACIONES HIDROTERMALES Y CARTOGRAFÍA MINERAL

5.1. Alteraciones hidrotermales (AH)

Las Alteraciones Hidrotermales (AH) son un indicador fundamental para comprender las temperaturas y condiciones de formación de los recursos geotérmicos. Estas alteraciones se originan por la interacción de las rocas con fluidos hidrotermales calientes, como agua, vapor o gases, los cuales poseen una alta concentración de minerales disueltos. Este proceso provoca cambios químicos, mineralógicos y texturales en las rocas, lo que da lugar a la formación de minerales guía característicos, asociados a rangos específicos de temperatura.

En los sistemas geotérmicos, las alteraciones hidrotermales se distribuyen generalmente en zonas de alta, intermedia y baja temperatura, dependiendo del tipo de alteración. A continuación, se presentan los tipos más comunes junto con sus minerales característicos y los rangos de temperatura asociados:

- **Argílica avanzada:** caolinita, alunita, cuarzo (100 – 300 °C).
- **Argílica intermedia:** illita, montmorillonita (100 – 250 °C).
- **Propilítica:** clorita, epidota, calcita, albita (200 – 300 °C).
- **Fílica:** cuarzo, sericita, pirita (250 – 350 °C).
- **Alteración potásica:** feldespato potásico, biotita, cuarzo (300 – 500 °C).
- **Argílica avanzada (ácida):** alunita, pirofilita, cuarzo (150 – 300 °C).

5.2 Detección de alteraciones hidrotermales mediante sensores remotos

La detección de zonas de AH a escala regional ha sido posible gracias al uso de sensores remotos y el análisis de imágenes satelitales. Estas tecnologías permiten identificar áreas afectadas por alteraciones hidrotermales y delimitar con mayor precisión las zonas con potencial geotérmico o mineralizado, optimizando la exploración de recursos naturales. Este enfoque resulta especialmente útil debido a la capacidad de los sensores multispectrales para captar datos en rangos específicos del espectro electromagnético, donde la reflectancia de ciertos

minerales asociados con alteraciones hidrotermales es particularmente distintiva.

Uno de los métodos más empleados para esta identificación es el Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés). Este método analiza las firmas espectrales registradas por los sensores para evaluar la distribución de minerales en el suelo, asociados con distintos tipos de alteraciones hidrotermales. Los resultados permiten generar mapas preliminares de alteraciones hidrotermales, que sirven como base para validar los hallazgos mediante estudios de campo, aumentando así la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos.

5.2 Aplicación de PCA con imágenes satelitales

En este estudio, el PCA se aplicó a imágenes satelitales provenientes de *Landsat 8*, *ASTER* y *Sentinel-2*. Estas imágenes fueron procesadas empleando combinaciones específicas de bandas espectrales diseñadas para identificar la distribución espacial de minerales asociados con alteraciones hidrotermales en las regiones de interés. Este enfoque permitió analizar las concentraciones minerales y sus patrones espaciales, proporcionando una base sólida para la exploración de recursos geotérmicos.

La integración de herramientas de análisis remoto con estudios de campo es fundamental para delimitar con precisión las zonas de alteración hidrotermal, incrementando la efectividad de las campañas de exploración. Este enfoque integrado no solo optimiza el uso de recursos, sino que también mejora significativamente la precisión en la identificación de áreas con alto potencial geotérmico.

5.3 Clasificación de minerales de alteración

Para determinar la distribución de minerales en la zona de estudio, se empleó la técnica de clasificación espectral supervisada, Spectral Angle Mapper (SAM). Este método es ampliamente utilizado en la identificación de minerales y zonas de alteración hidrotermal, ya que permite analizar las firmas espectrales de los materiales presentes en la superficie terrestre. Estas firmas espectrales se comparan con una biblioteca de referencia, como la Biblioteca Espectral del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), proporcionando una clasificación

precisa de los minerales y áreas de alteración detectadas mediante imágenes satelitales o datos espectrales.

Esta metodología facilita la creación de mapas temáticos que muestran la distribución de minerales y permite clasificar áreas afectadas por alteración hidrotermal según los minerales presentes. Además, identifica preliminarmente zonas con interés geotérmico, proporcionando información clave para priorizar futuras exploraciones.

El método SAM es particularmente efectivo para identificar minerales asociados a diferentes tipos de alteración hidrotermal, entre los cuales se destacan:

- **Alteración argílica avanzada:** caolinita, alunita, dickita, cuarzo.
- **Alteración argílica intermedia:** illita, montmorillonita.
- **Alteración propilítica:** clorita, epidota, calcita, albita.
- **Alteración fílica:** cuarzo, sericita, pirita.
- **Alteración potásica:** feldespato potásico, biotita.
- **Silicificación:** cuarzo, ópalo.
- **Oxidación superficial:** hematita, goethita, limonita.

El uso del método SAM representa como una herramienta útil para caracterizar zonas de alteración hidrotermal y orientar las investigaciones hacia áreas con alto potencial geotérmico, optimizando así los esfuerzos exploratorios y mejorando la eficacia en la identificación de recursos energéticos.

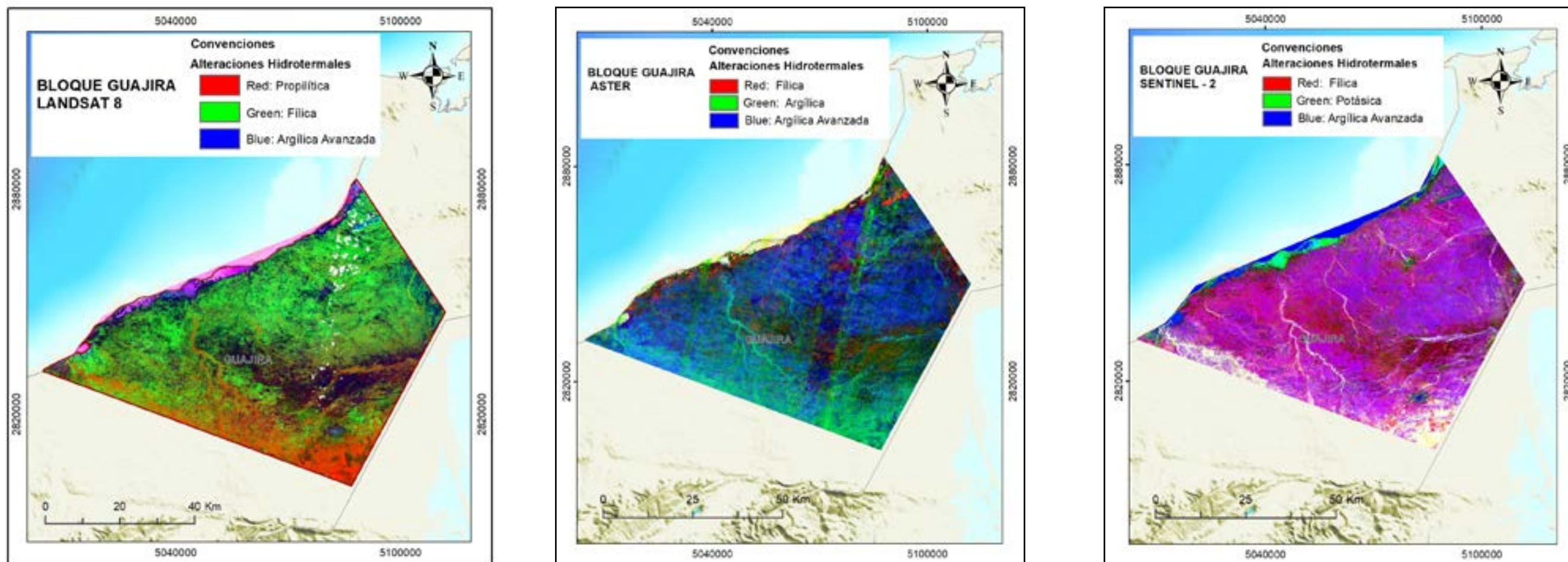


Figura 5.1. Análisis de Componentes Principales. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 1, Guajira. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El Bloque Guajira, ubicado en la cuenca sedimentaria de Guajira, revela la presencia de alteraciones hidrotermales significativas según los PCA aplicados a imágenes satelitales. Con datos del sensor Landsat 8, se identificaron alteraciones de tipo filica, mientras que el sensor ASTER permitió clasificar estas alteraciones como argílicas avanzadas, representadas en tonalidades verdes.

Adicionalmente, tanto en las imágenes de Landsat 8 como en las de ASTER, se observaron alteraciones de tipo potásica y filica, representadas en tonalidades azules, principalmente en la parte central del bloque.

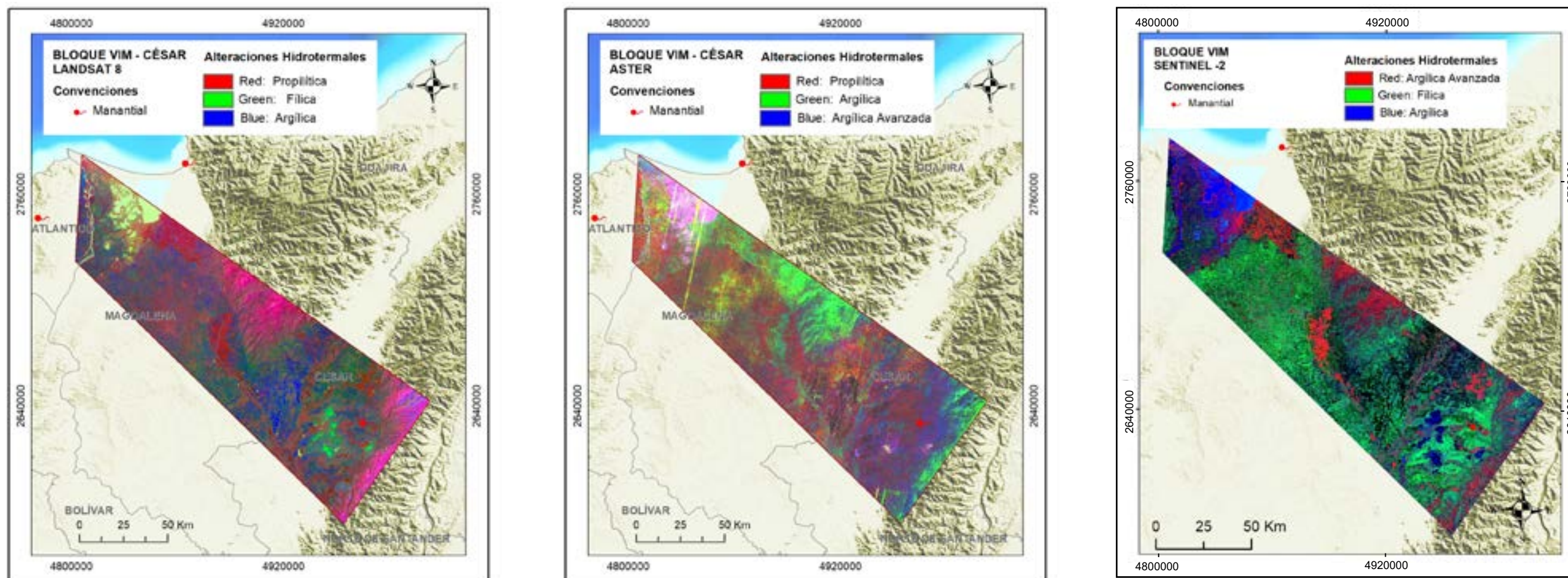


Figura 5.2. Análisis de Componentes Principales. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 2, VIM-Cesar. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El Bloque VIM-César se encuentra en la intersección de tres principales cuencas sedimentarias: al norte, la cuenca Sinú-San Jacinto; en la parte central, la cuenca del Valle Inferior de Magdalena; y al sur, la cuenca César-Ranchería.

- **Landsat 8:** El análisis de componentes principales identifica tonalidades verdes, asociadas a alteraciones de tipo filica, tanto en la parte norte como en la sur del bloque. En el resto del área, predominan colores rojos que indican una alteración de tipo propilítica.

- **ASTER:** Se observa alteración argílica representada en color verde, mientras que en la parte norte, en menor proporción, se identifica alteración propilítica.
- **Sentinel:** El análisis muestra alteraciones filicas en verde, argílicas en azul y alteraciones argílicas avanzadas en tonalidades rojas.

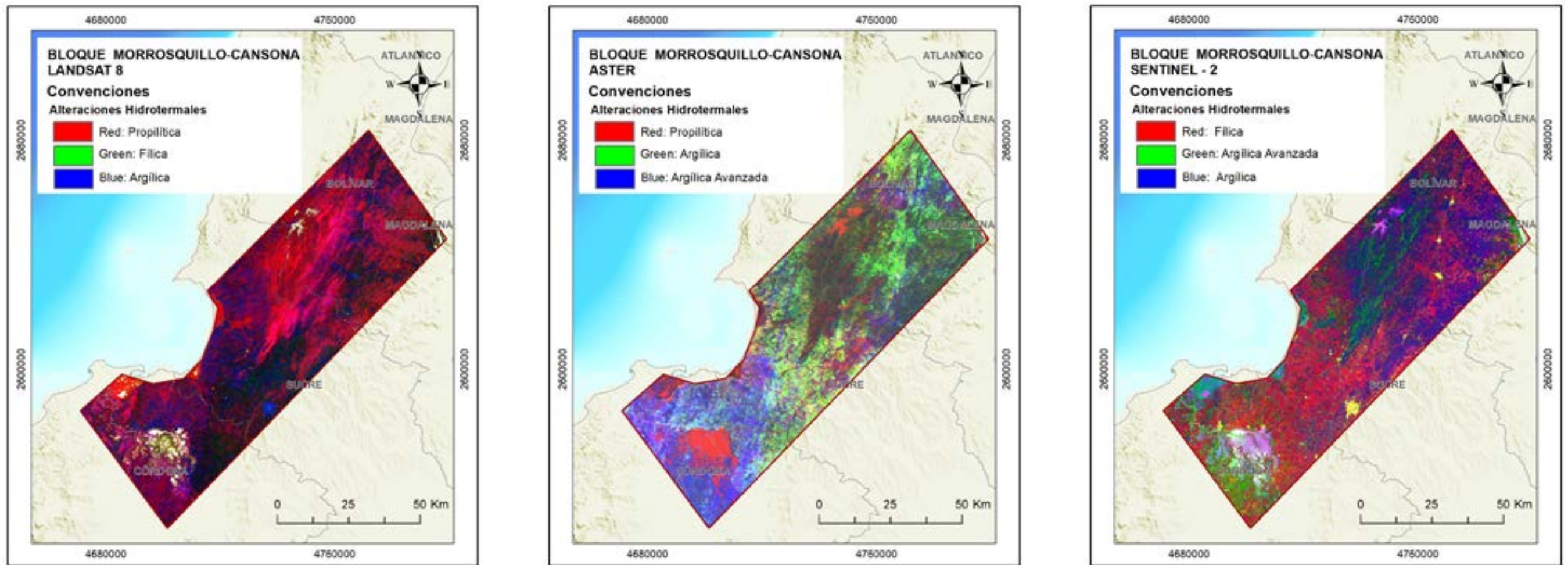


Figura 5.3. Análisis de Componentes Principales. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 3, Morrosquillo-Cansona. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El Bloque Morrosquillo-Cansona, ubicado en la Cuenca Sinú San Jacinto y en parte del Valle Inferior del Magdalena hacia el noreste, muestra diferentes tipos de alteraciones según el análisis de sensores remotos.

En las imágenes de Landsat 8, las tonalidades rojas indican alteraciones de tipo propilítico, concordantes con las zonas en colores rojos observadas en el sensor ASTER hacia la parte sur del bloque, donde también se identifican alteraciones argílicas en tonalidades verdes.

Por su parte, el sensor SENTINEL destaca sectores con coloraciones azules, que corresponden a alteraciones de tipo argílico, y en tonalidades rojas, alteraciones de tipo fílico.

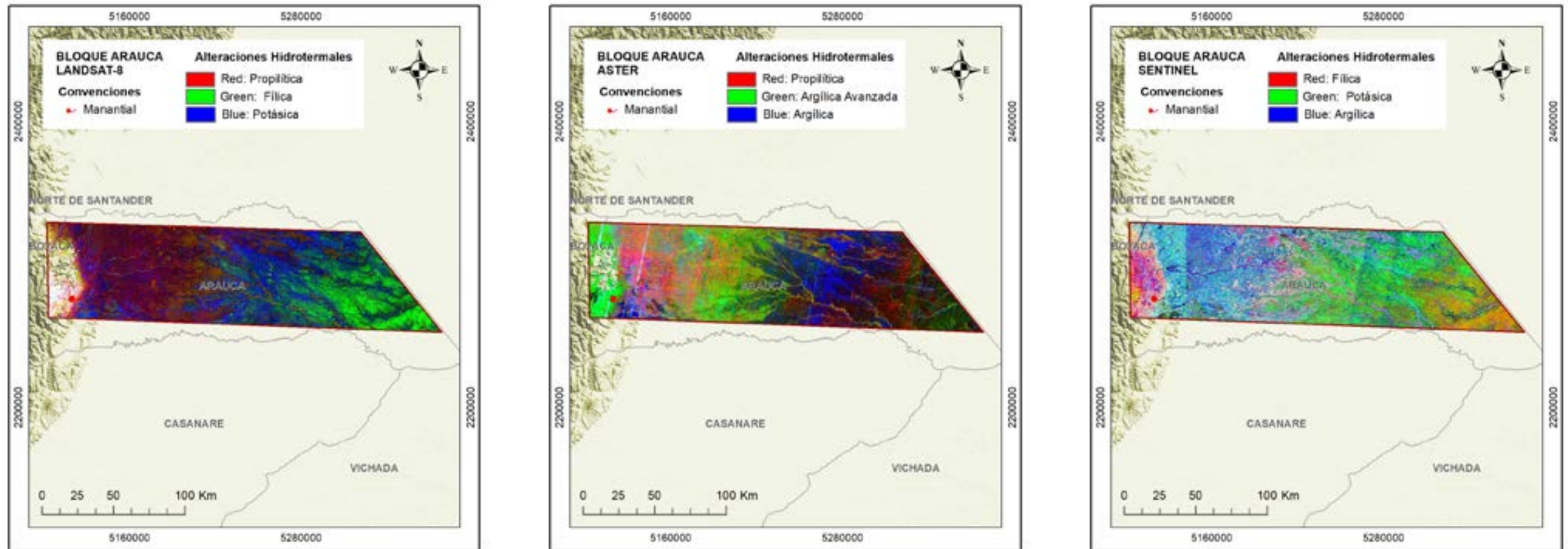


Figura 5.4. Análisis de Componentes Principales. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 4, Arauca. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El Bloque Arauca, ubicado en la cuenca Llanos Orientales, presenta las siguientes características según el análisis de componentes principales:

- **Landsat 8:**
 - Alteraciones de tipo fílica en el sector oriental del bloque, representadas en tonalidades verdes.
 - Alteraciones de tipo potásica en la parte central del bloque.
- **ASTER:**
 - Alteraciones de tipo propilítica hacia el sector occidental.
 - Alteraciones argílicas concentradas en la parte centro-oriental del bloque.
 - Alteraciones argílicas avanzadas hacia el extremo oriental del bloque.
- **Sentinel:**
 - Alteraciones de tipo fílica en el extremo oriental del bloque.
 - Alteraciones dispersas de tipo fílica hacia la zona central.

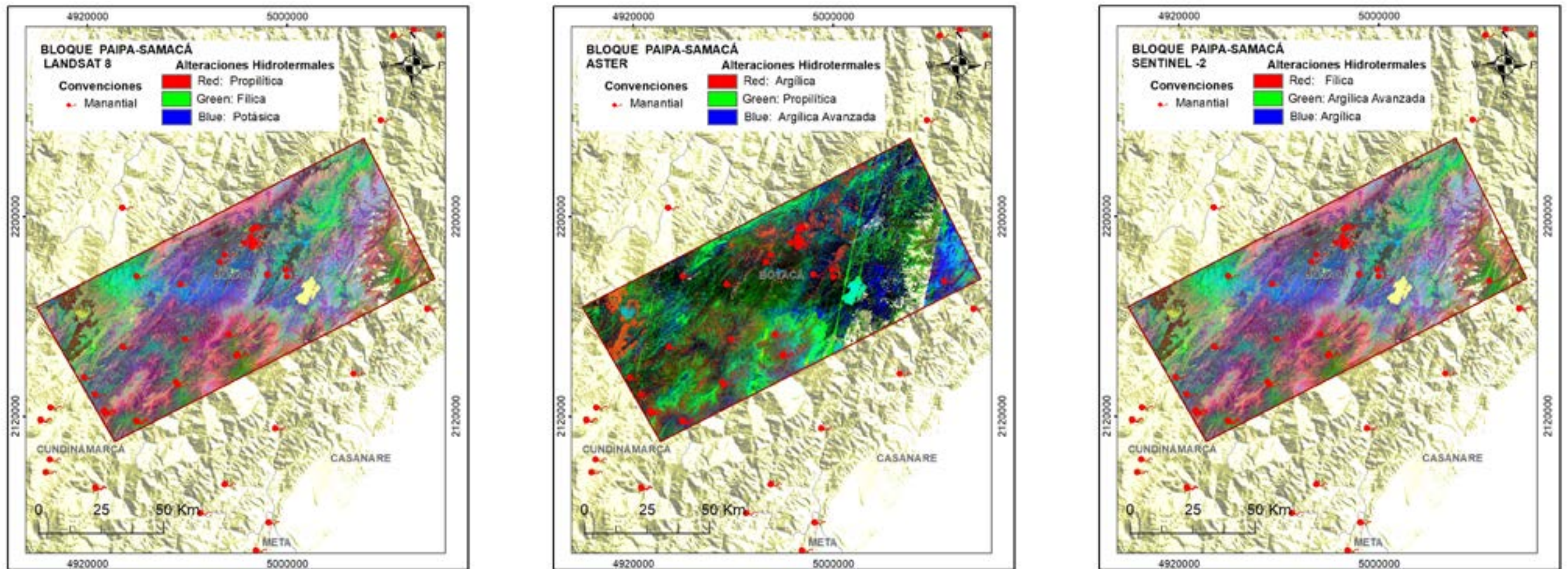


Figura 5.5. Análisis de Componentes Principales. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 5, Paipa-Samacá. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El Bloque Paipa-Samacá alberga, en su parte central, las áreas geotérmicas de Paipa e Iza. En el análisis de componentes principales, se observan tonalidades azules que indican alteraciones potásicas; mientras que, en los sectores noreste y noroeste, se identifican alteraciones fílicas. En el sur del bloque, se presentan alteraciones propílicas de manera dispersa. Por otro lado, en

las imágenes obtenidas con el sensor ASTER, se destacan las alteraciones argílicas en tonos azules y las alteraciones argílicas avanzadas en verde.

En SENTINEL las alteraciones hidrotermales que se muestran son de tipo argílico avanzada en tonalidades verdes y hacia la parte central del bloque alteraciones de tipo argílico.

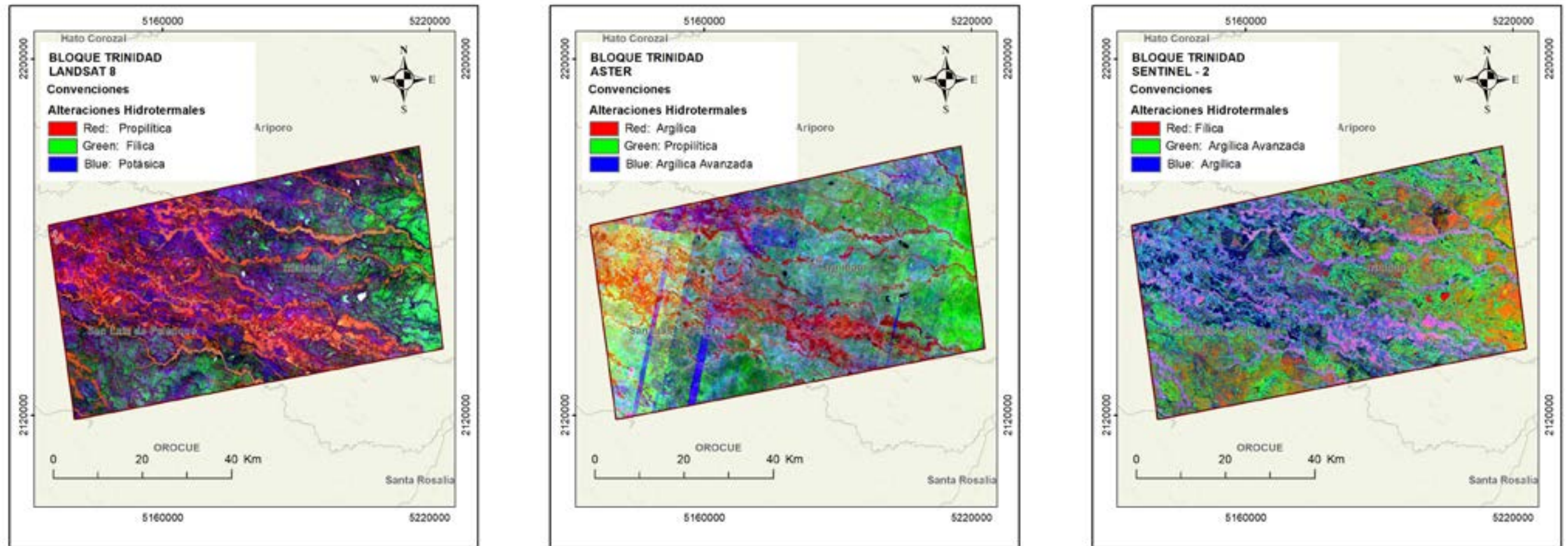


Figura 5.6. Análisis de Componentes Principales. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 6, Trinidad. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El Bloque Trinidad, ubicado en la cuenca de los Llanos Orientales, presenta diferentes tipos de alteraciones según el Análisis de Componentes Principales (ACP):

- **Landsat 8:** Las tonalidades verdes indican alteraciones de tipo argílico.

- **ASTER:** Se destacan alteraciones argílicas en las zonas de drenaje y hacia la parte oriental del bloque.
- **Sentinel:** Se evidencian alteraciones argílicas en tonalidades azules, mientras que las tonalidades rojizas corresponden a alteraciones de tipo fílico.

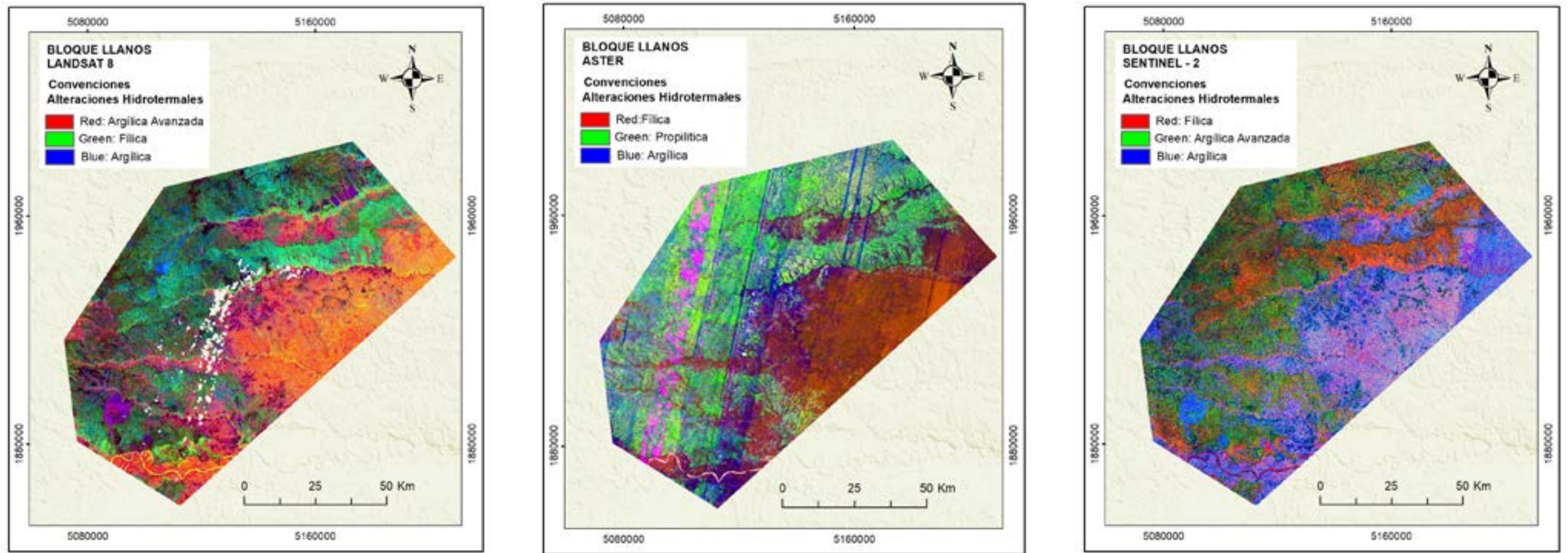


Figura 5.7. Análisis de Componentes Principales. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 7, Llanos. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El Bloque Llanos, ubicado en el sector centro-norte de la cuenca sedimentaria Llanos Orientales, presenta diversas alteraciones según el análisis de sensores remotos. En las imágenes

de Landsat 8, hacia el sector oriental del bloque, los colores rojos sugieren alteraciones de tipo argílica avanzada. Por su parte, el sensor ASTER destaca alteraciones de tipo propilítica en tonalidades verdes, mientras que en las imágenes de SENTINEL, las alteraciones filicas se evidencian en tonalidades rojas.

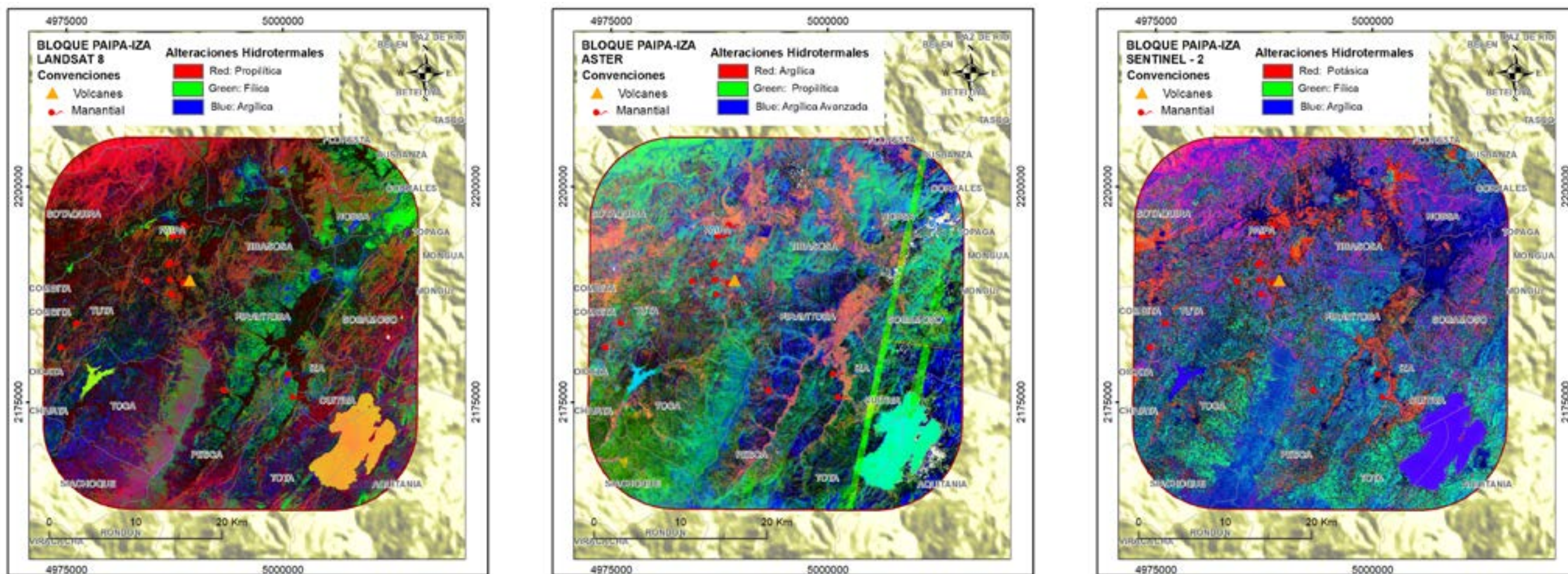


Figura 5.8. Análisis de Componentes Principales. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 8, CO-Paipa-Iza. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El Bloque CO-Paipa-Iza se encuentra en la región central de la Cordillera Oriental de Colombia, donde se registran manifestaciones termales asociadas a las áreas geotérmicas de Paipa e Iza. En la imagen obtenida mediante Análisis de Componentes Principales, utilizando el sensor OLI del satélite Landsat-8, se pueden observar alteraciones propilíticas, filicas y argílicas. Por otro lado, con el sensor ASTER del satélite Terra se identifican alteraciones argílicas y argílicas avanzadas. Además, el sensor SENTINEL permite detectar alteraciones argílicas, filicas y potásicas.

En la zona central del Bloque Paipa-Iza se destacan tonalidades azules, que indican la presencia de alteraciones de tipo argílico. Esta área alberga depósitos volcánicos y domos, localizados en los sectores de Alto de los Volcanes, Quebrada Honda y Alto de los Godos. En la imagen obtenida mediante Análisis de Componentes Principales del sensor ASTER, se observa un predominio de alteraciones argílicas avanzadas sobre las argílicas y propilíticas.

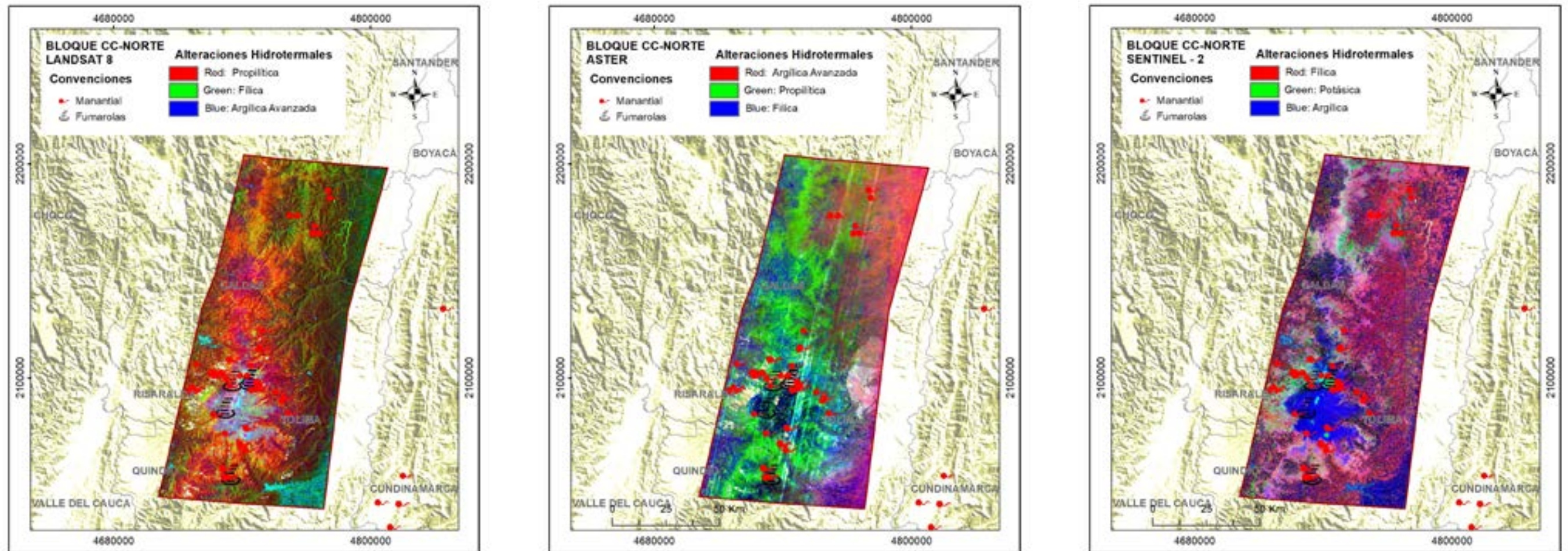


Figura 5.9. Análisis de Componentes Principales. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 9, CC-Norte. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El Bloque CC-Norte, según el análisis de componentes principales, presenta las siguientes características:

- **Landsat 8:**
 - Tonalidades rojas que indican alteraciones de tipo propilítico.
 - En el sector norte, se observan colores verdes asociados a alteraciones de tipo argílica.
- **ASTER:**
 - En la parte central del bloque, se evidencian alteraciones de tipo propilítico.
 - Hacia el sector oriental, se registra una alteración de tipo argílica avanzada.
- **Sentinel:**
 - Alteraciones de tipo argílica representadas en tonalidades azules, principalmente en la parte central del bloque.

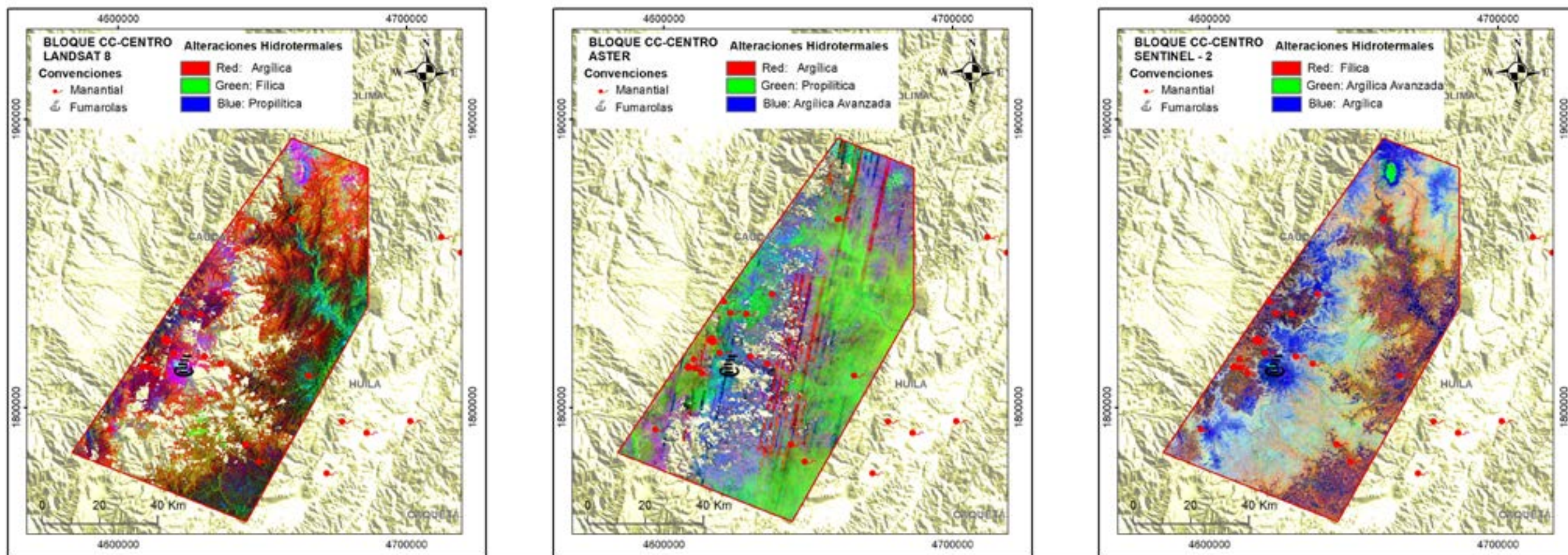


Figura 5.10. Análisis de Componentes Principales. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 10, CC-Centro. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El Bloque CC-Centro incluye en su parte oriental el Bloque Geotérmico Huila-Sucubún, caracterizado por un significativo número de manantiales y una zona de fumarolas.

- **Landsat 8:** El análisis de componentes principales muestra alteraciones de tipo filica y argílica hacia el sector oriental del bloque.

- **ASTER:** Se registra una alteración propilítica de manera dispersa, cubriendo aproximadamente el 60% del área del bloque.
- **Sentinel:** Se identifican alteraciones de tipo argílica hacia los sectores occidental y norte del bloque.

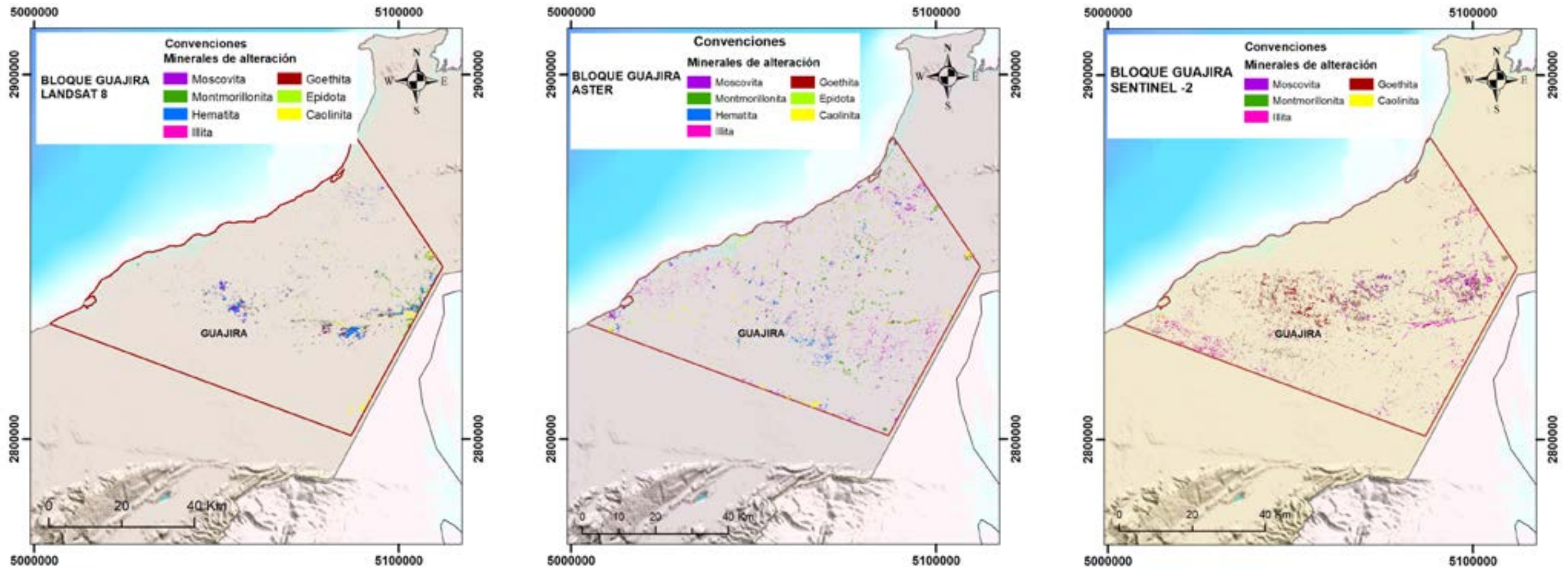


Figura 5.11. Mapas de minerales de alteración. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 1, Guajira. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Minerales de alteración en el Bloque 1, Guajira

En el bloque Guajira, la clasificación supervisada Spectral Angle Mapper (SAM) permitió identificar, a partir del análisis de imágenes Landsat 8, la presencia de hematita, predominantemente en la parte central y oriental del bloque, acompañada de goethita. Hacia el borde oriental se resaltan minerales arcillosos como la caolinita, mientras que la montmorillonita aparece de forma dispersa y sin una orientación definida.

En las imágenes ASTER se identificaron otros minerales, como illita y moscovita, distribuidos de manera dispersa a lo largo de todo el bloque. Por su parte, los datos obtenidos de SENTINEL muestran una concentración de goethita en la parte central del bloque, representada en color rojo, illita hacia el sector oriental con una distribución lineal, y caolinita de manera muy esporádica.

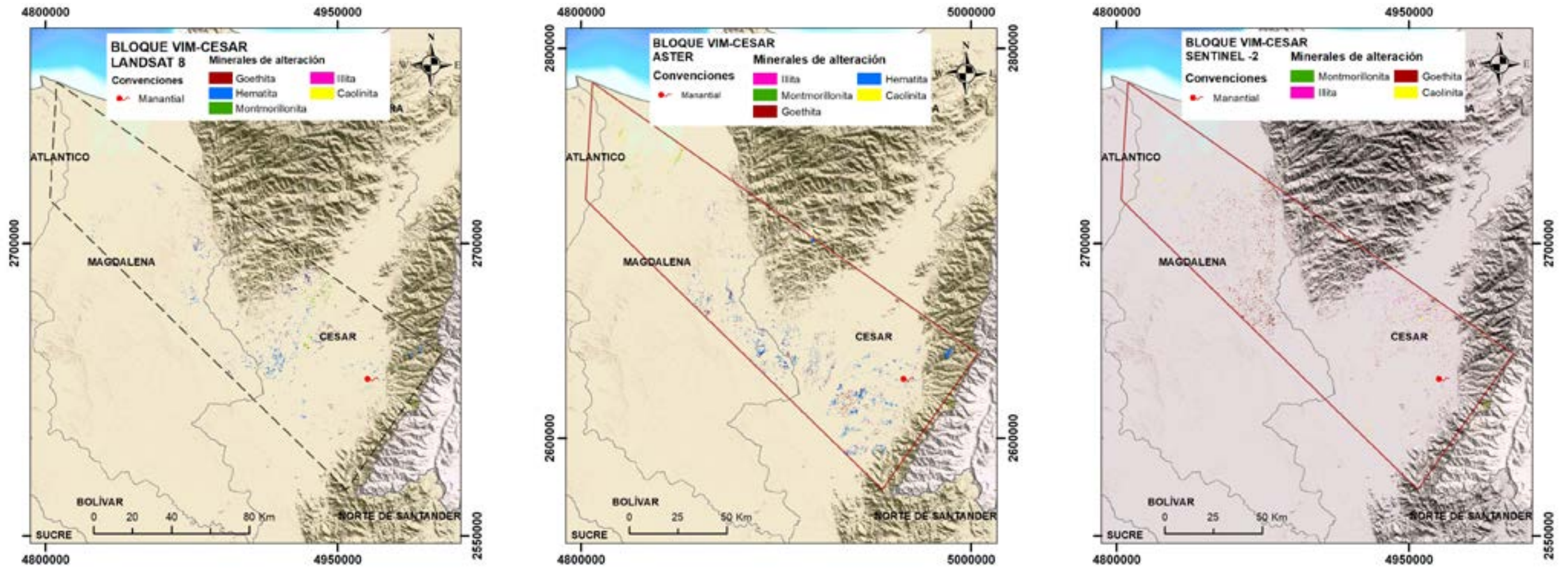


Figura 5.12. Mapas de minerales de alteración. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 2, VIM-Cesar. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Minerales de alteración en el Bloque 2, VIM-Cesar

En el bloque VIM-Cesar, la clasificación SAM aplicada a imágenes Landsat 8 permitió identificar principalmente hematita e illita, con una menor proporción de caolinita, distribuidas de manera dispersa en la zona central del bloque.

Los análisis realizados con imágenes ASTER revelan una mayor concentración de goetita hacia el sector oriental, cercana a los lineamientos estructurales con orientación noreste-suroeste (NE-SW). Por su parte, los datos de SENTINEL destacan una concentración difuminada de goetita en la parte central del bloque, alineada con la zona de la falla principal de orientación noroeste-sureste (NW-SE).

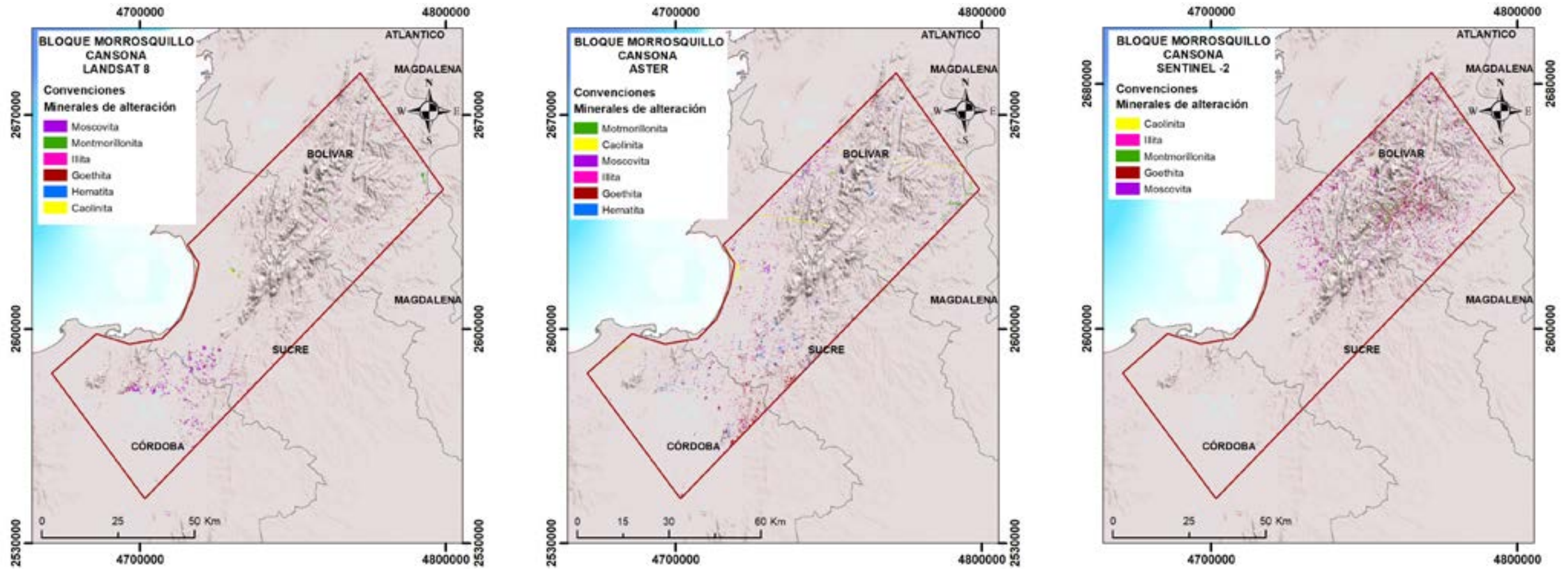


Figura 5.13. Mapas de minerales de alteración. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 3, Morrosquillo-Cansona. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Minerales de alteración en el Bloque 3, Morrosquillo-Cansona

En el bloque Morrosquillo-Cansona, la clasificación de minerales mediante el método SAM permitió identificar una serie de minerales de alteración distribuidos principalmente hacia el sur del bloque, en una franja asociada a un conjunto de fallas con orientación norte-sur. En esta área destacan la moscovita, la illita y algunas concentraciones de goetita. En el sector central se observan zonas con minerales de alteración, como la caolinita (representada en amarillo) y la montmorillonita, mientras que hacia el norte predomina la illita.

Los análisis de imágenes ASTER confirman la zonificación de la moscovita e illita, pero además revelan la presencia de sectores adicionales con hematita, goetita y montmorillonita. Por su parte, los resultados obtenidos con imágenes SENTINEL muestran los mismos minerales y patrones de distribución observados previamente.

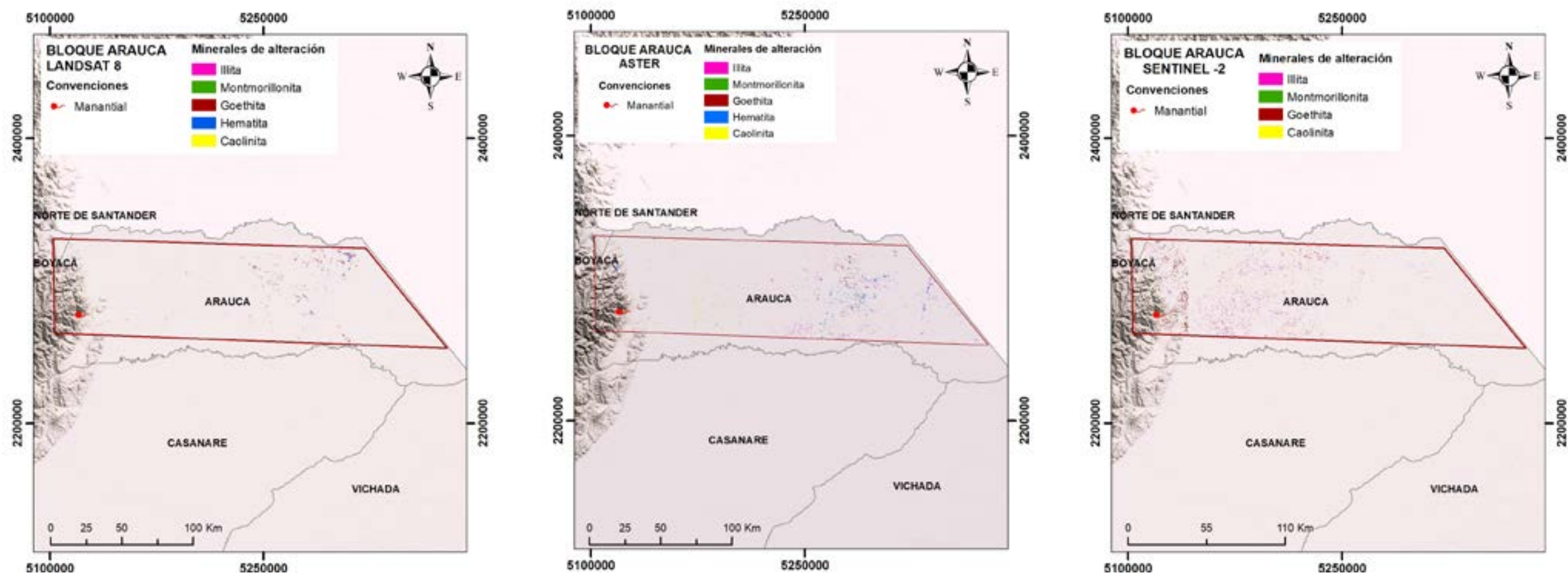


Figura 5.14. Mapas de minerales de alteración. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 4, Arauca. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Minerales de alteración en el Bloque 4, Arauca

En el bloque Arauca, la clasificación SAM aplicada a imágenes Landsat 8 permitió identificar principalmente minerales de goethita (rojo) e illita (magenta) concentrados hacia el sector oriental del bloque, junto con una presencia muy puntual y dispersa de hematita (azul).

Los resultados obtenidos con imágenes ASTER destacan un ligero aumento en la concentración de hematita en el sector oriental. Por otro lado, los análisis con imágenes SENTINEL revelan una mayor proporción de minerales en el sector occidental y en el piedemonte, donde predominan la illita, la goethita y, de forma dispersa, la caolinita.

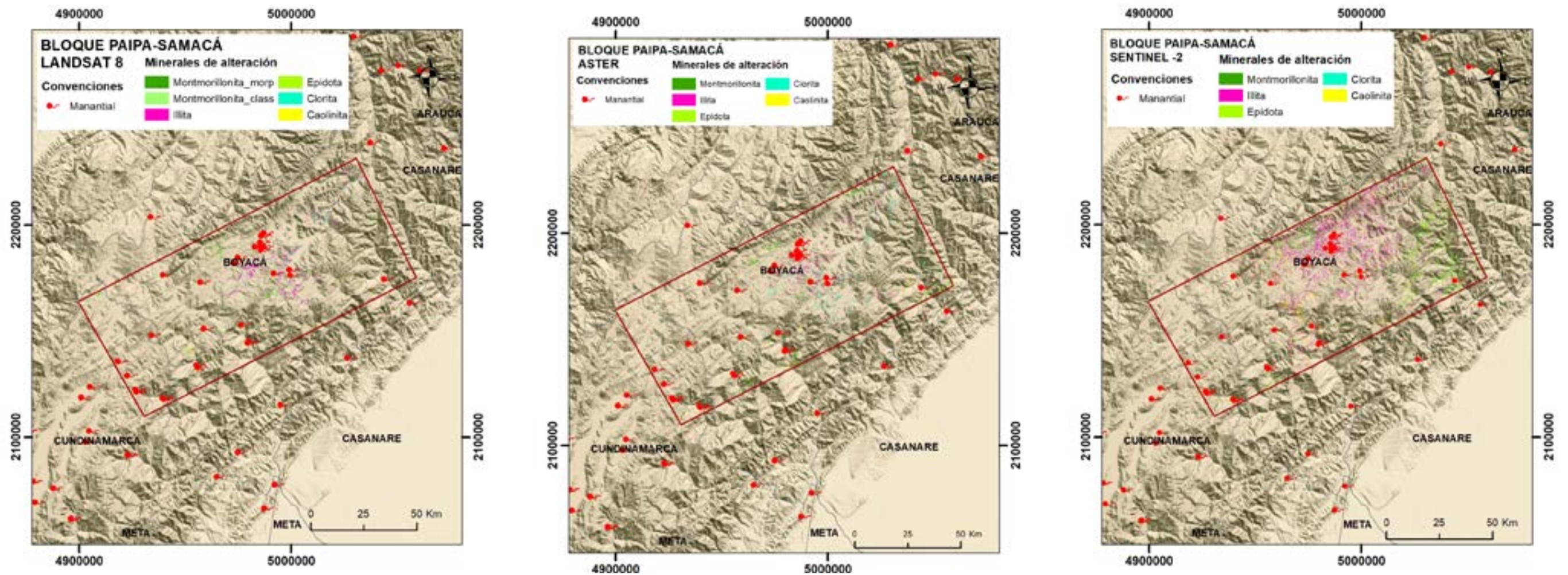


Figura 5.15. Mapas de minerales de alteración. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 5, Paipa-Samacá. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Minerales de alteración en el Bloque 5, Paipa-Samacá

El Bloque Paipa-Samacá alberga, en su parte central, las áreas geotérmicas de Paipa e Iza. En el análisis de componentes principales, se observan tonalidades azules que indican alteraciones potásicas; mientras que, en los sectores noreste y noroeste, se identifican alteraciones fílicas. En el sur del bloque, se presentan alteraciones propílicas de manera dispersa. Por otro lado, en

las imágenes obtenidas con el sensor ASTER, se destacan las alteraciones argílicas en tonos azules y las alteraciones argílicas avanzadas en verde.

En SENTINEL las alteraciones hidrotermales que se muestran son de tipo argílico avanzada en tonalidades verdes y hacia la parte central del bloque alteraciones de tipo argílico.

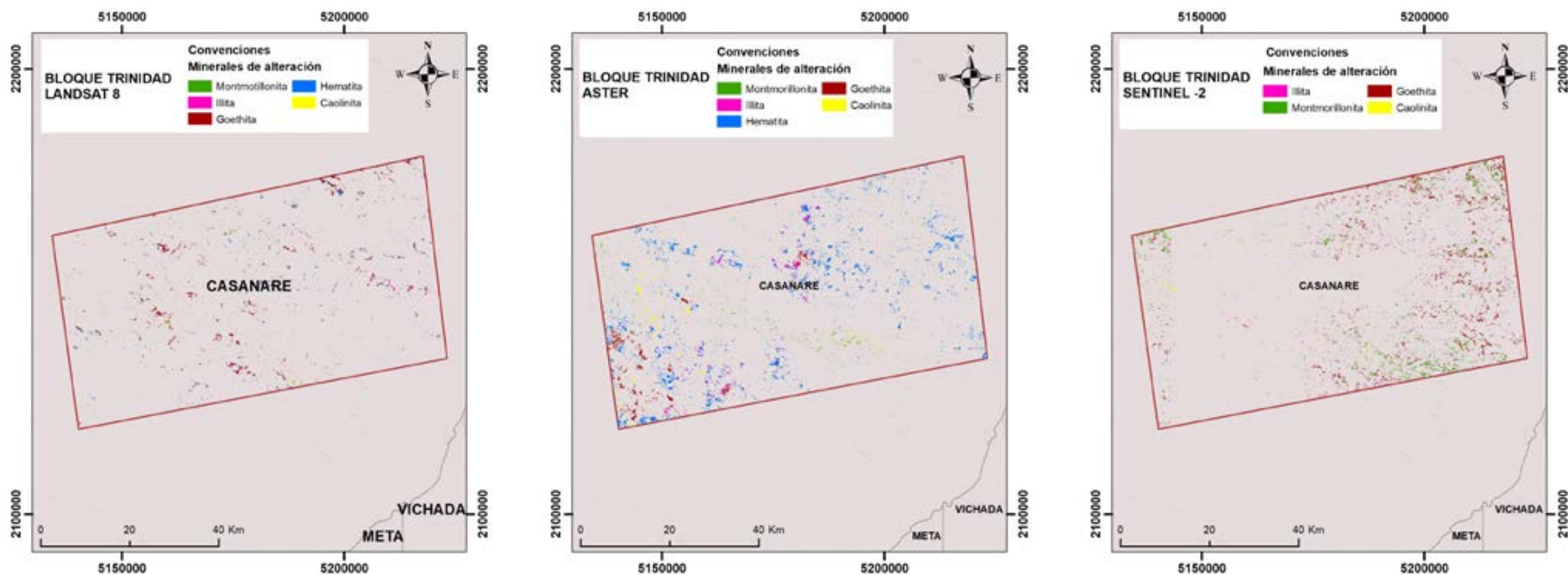


Figura 5.16. Mapas de minerales de alteración. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 6, Trinidad. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Minerales de alteración en el Bloque 6, Trinidad

En el bloque Trinidad, el análisis de minerales mediante el método SAM permitió identificar la presencia dispersa de goetita (rojo) e illita (magenta) a lo largo de todo el bloque, junto con concentraciones puntuales de hematita (azul) y caolinita (amarillo), esta última distribuida de forma irregular y sin una orientación definida.

Los resultados obtenidos con imágenes ASTER evidencian un aumento en la proporción de hematita (azul) y caolinita (amarillo), distribuidas en franjas dispersas dentro del bloque. En contraste, los datos de SENTINEL destacan una mayor concentración de goetita hacia la parte oriental del bloque, mientras que la caolinita predomina en el sector occidental.

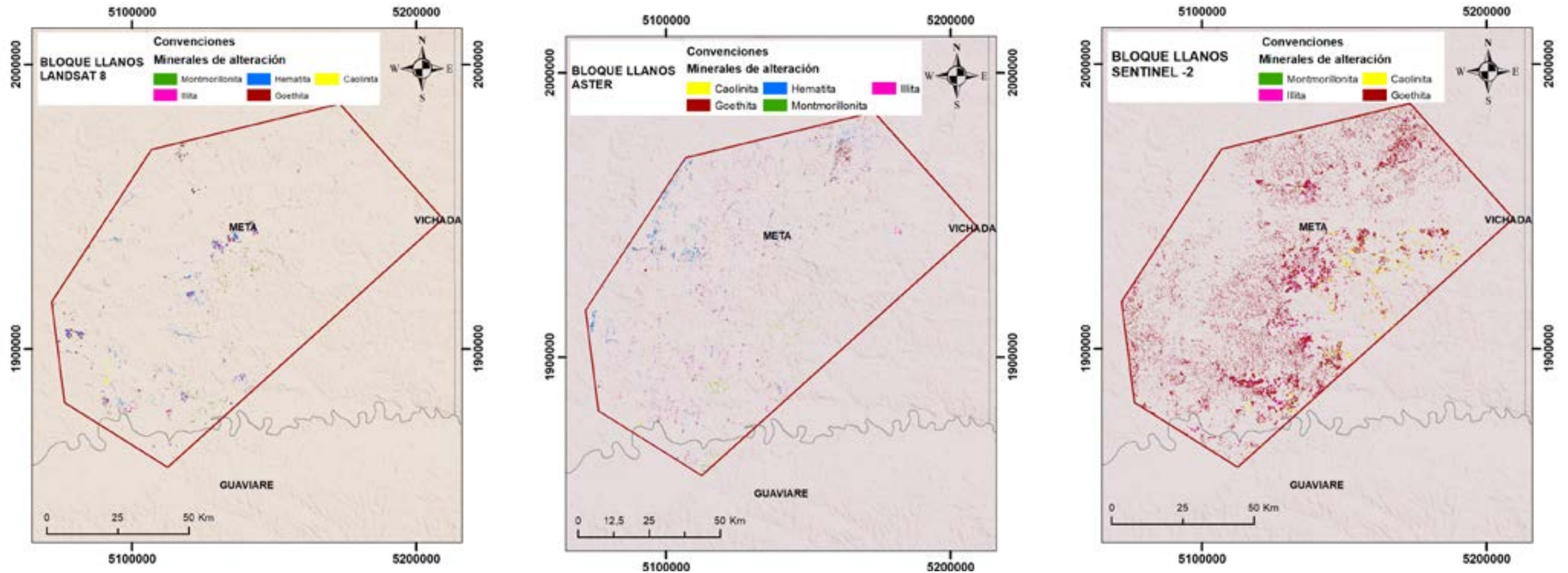


Figura 5.17. Mapas de minerales de alteración. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 7, Llanos. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Minerales de alteración en el Bloque 7, Llanos

En el bloque Llanos se identificaron minerales como illita (magenta), hematita (azul) y caolinita (amarillo), distribuidos en sectores del centro y sur del bloque, sin una orientación definida. Los

resultados obtenidos con imágenes ASTER muestran concentraciones dispersas de illita y caolinita, mientras que los datos de SENTINEL destacan una mayor presencia de goetita, extendida sobre una amplia área del bloque, y caolinita concentrada hacia la parte oriental.

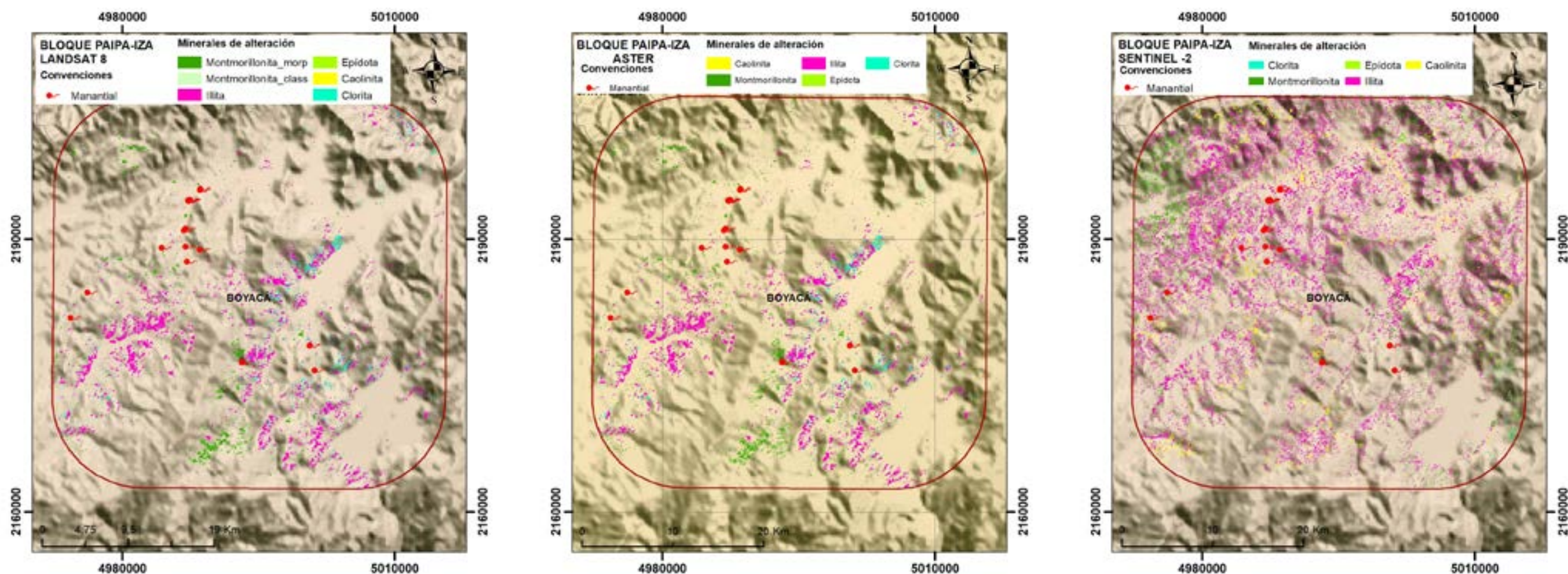


Figura 5.18. Mapas de minerales de alteración. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 8, CO-Paipa-Iza. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Minerales de alteración en el Bloque 8, CO-Paipa-Iza

El análisis de minerales de alteración en el Bloque Paipa-Iza, realizado mediante la clasificación supervisada *Spectral Angle Mapper* (SAM) aplicada a imágenes de Landsat 8, permitió identificar la siguiente distribución:

- **Illita** (magenta): Predomina en la parte centro-oriental del bloque y en las zonas asociadas a trazos de fallas.
- **Clorita** (cian): Se detectó en la parte central del bloque y hacia el sector sur.
- **Montmorillonita** (verde): Principalmente presente en el sector sur y noreste del bloque.

Los resultados obtenidos con imágenes ASTER son consistentes con los de Landsat 8, mostrando una predominancia de illita hacia el sector central, extendiéndose hacia la parte suroriental y en las áreas de trazos y cruces de fallas. En estas zonas también se identificó la presencia de montmorillonita.

Por su parte, el análisis SAM en Sentinel evidencia un mayor porcentaje de illita en el bloque. Asimismo, se identificaron firmas de caolinita distribuidas de manera dispersa en gran parte del bloque, mientras que en el sector nororiental se observaron áreas con presencia de montmorillonita.

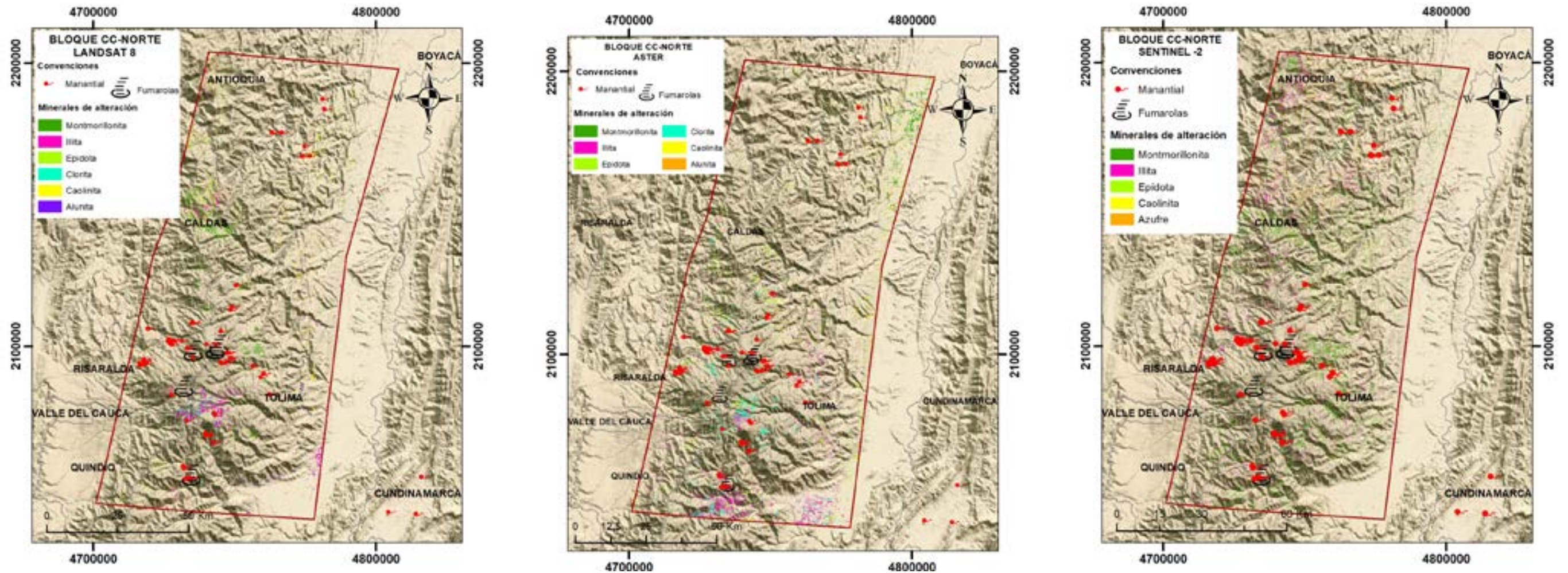


Figura 5.19. Mapas de minerales de alteración. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 9, CC-Norte. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Minerales de alteración en el Bloque 9, CC-Norte

En el bloque CC-Norte, el análisis mediante el método SAM aplicado a imágenes Landsat 8 permitió identificar minerales como montmorillonita y epidota (en color verde) hacia el sector nororiental, con algunas concentraciones dispersas hacia el centro y centro-sur del bloque. En la zona de mayor abundancia de manantiales termales, alineada con la falla de orientación noreste-suroeste (NE-SW), se identificaron minerales como illita (magenta) y alunite (morado).

Los resultados obtenidos con imágenes ASTER revelan una distribución diseminada de epidota (verde) en la parte central del bloque, mientras que, hacia el sur, en una zona asociada a fumarolas, se observaron minerales tipo illita. Por su parte, los datos de SENTINEL reflejan un patrón de distribución de minerales consistente con los resultados previos.

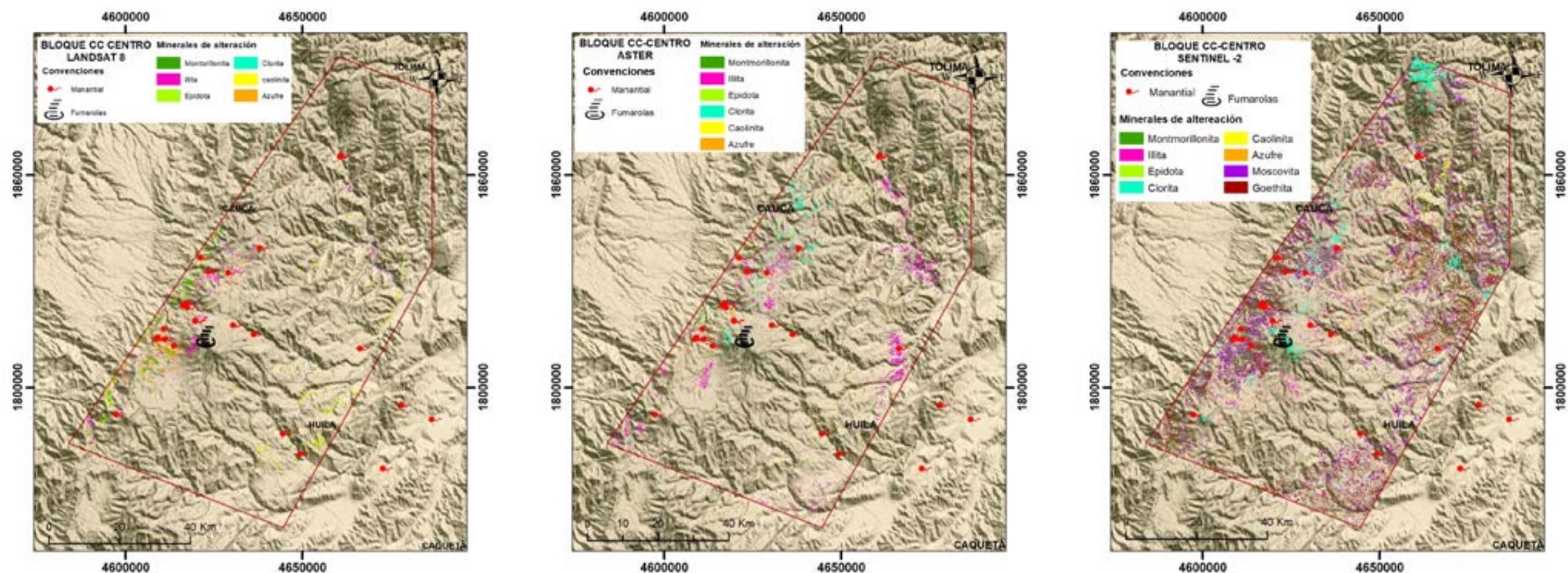



Figura 5.20. Mapas de minerales de alteración. Imágenes satelitales procesadas, correspondientes al Bloque 10, CC-Centro. Izquierda: LANDSAT 8; Centro: ASTER; Derecha: SENTINEL. Se incluyen trazos principales de fallas geológicas, fumarolas, manantiales y tipos identificados de alteración hidrotermal.

Minerales de alteración en el Bloque 10, CC-Centro

En el bloque CC-Centro, la clasificación SAM permitió identificar principalmente la presencia de caolinita hacia el sector oriental, con una orientación preferencial noreste-suroeste, asociada a las zonas de influencia de las fallas. En el mismo sector oriental se evidenció la presencia de montmorillonita y epidota (representadas en colores verdes), concentradas en áreas con mayor abundancia de manantiales termales y depósitos minerales azufrados, especialmente en la región centro-oriental donde se ubican fumarolas y manantiales.

Los resultados obtenidos con imágenes ASTER destacan la presencia de illita y clorita, distribuidas de manera alineada con las fallas y, en menor proporción, de forma dispersa en el bloque. Estos patrones son consistentes con los minerales identificados en las imágenes SENTINEL, manteniendo una distribución similar dentro del mismo contexto estructural.

The background features a series of overlapping circles of varying radii, creating a complex geometric pattern. A single horizontal line bisects the entire composition. The color palette is a gradient of yellow, transitioning from a pale, almost white shade on the left to a vibrant, saturated yellow on the right.

CAPÍTULO 6

Geobotánica y Anomalías Vegetales



CAPÍTULO 6.1 ÍNDICES ESPECTRALES DE VEGETACIÓN

Los índices de vegetación son herramientas clave para entender la salud y las características de la vegetación, a partir de imágenes satelitales. En estudios de geobotánica, especialmente en regiones de interés geotérmico, permiten identificar cambios en el tipo, densidad o estado de la vegetación. Esto es importante porque la vegetación responde a fenómenos subterráneos como la actividad geotérmica, que puede alterar el suelo y la

disponibilidad de agua, proporcionando pistas sobre los procesos geológicos subyacentes.

En este estudio, los índices fueron generados a partir de imágenes obtenidas por sensores multiespectrales de los satélites Landsat 8 y Sentinel-2, con resoluciones espaciales de 30 m y 10 m, respectivamente. Estas imágenes permiten un análisis detallado a diferentes escalas, facilitando la identificación de patrones vegetativos incluso en áreas más pequeñas.

Cada índice tiene un propósito específico, sus valores oscilan entre -1 y 1, y se calculan

a partir de combinaciones de las bandas espectrales de las imágenes satelitales:

- **NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)** mide la densidad de la vegetación, permitiendo identificar áreas con mayor cobertura vegetal.
- **NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada)** evalúa la humedad de las plantas, ayudando a detectar zonas con estrés hídrico.
- **EVI (Índice Mejorado de Vegetación)** optimiza el análisis en áreas con vegetación densa, reduciendo el efecto del suelo y la atmósfera.

- **OSAVI (Índice Optimizado de Vegetación Ajustado al Suelo)** y **MSAVI (Índice Modificado de Vegetación Ajustado al Suelo)** son útiles para detectar vegetación en áreas con suelos parcialmente descubiertos.
- **NBRI (Índice de Relación de Quemado Normalizada)** detecta posibles daños o cambios en la vegetación, como los causados por estrés térmico.
- **GCI (Índice de Clorofila Verde)** mide los niveles de clorofila en las plantas, un indicador directo de su salud.

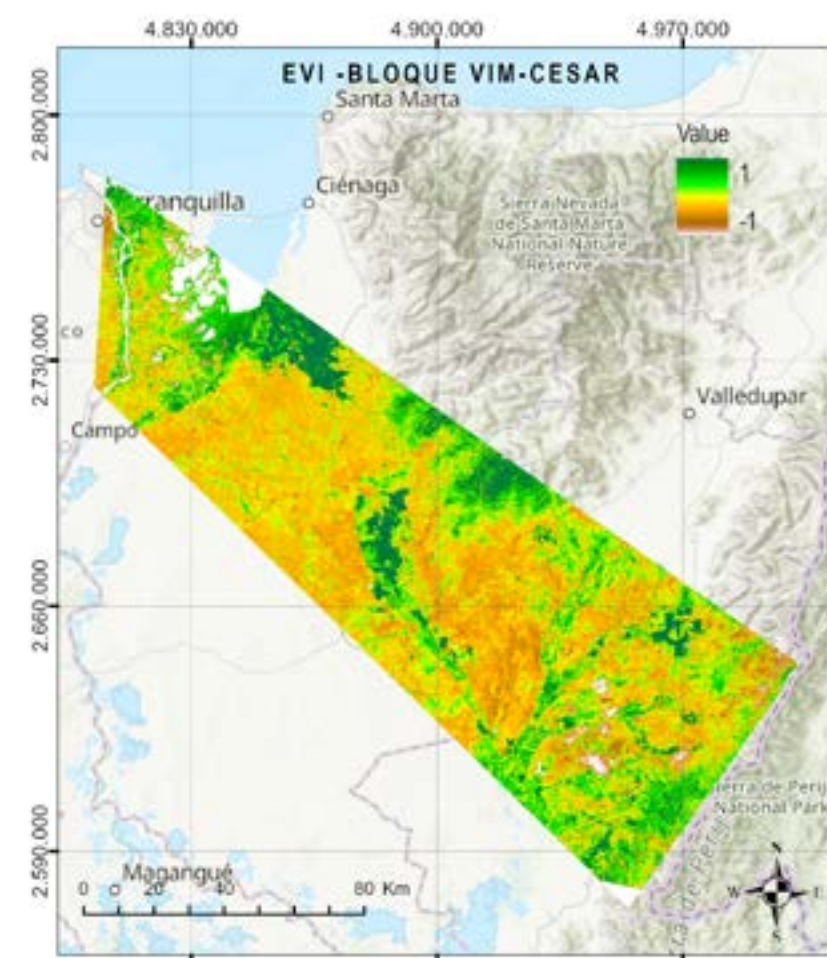
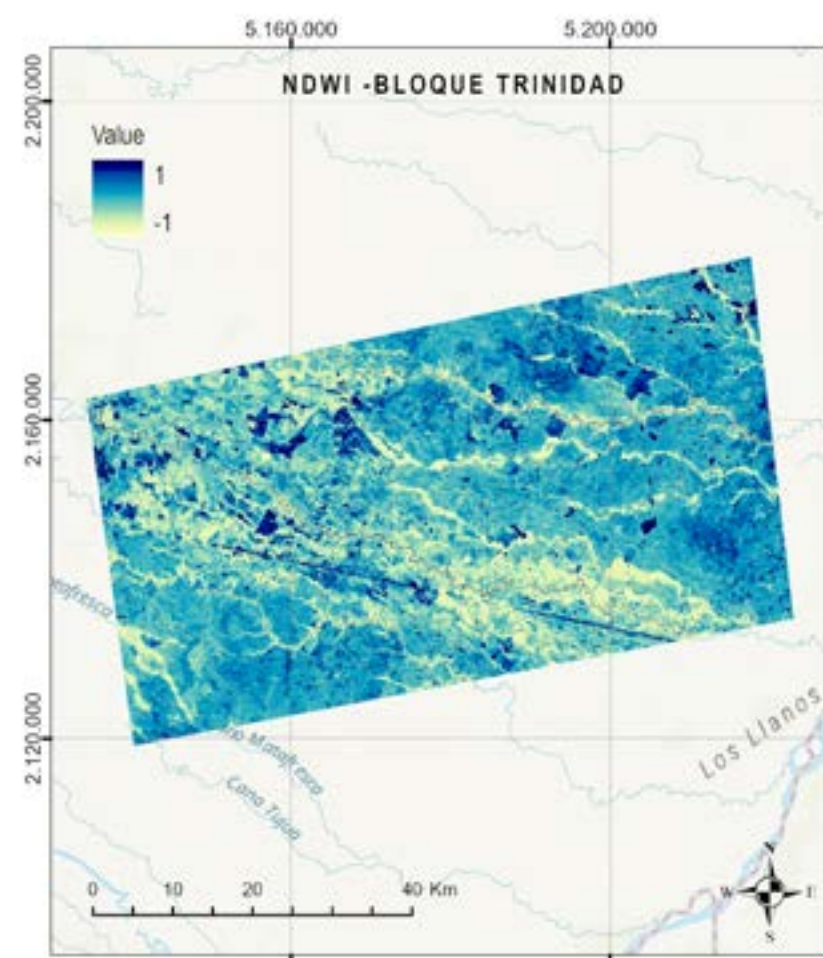
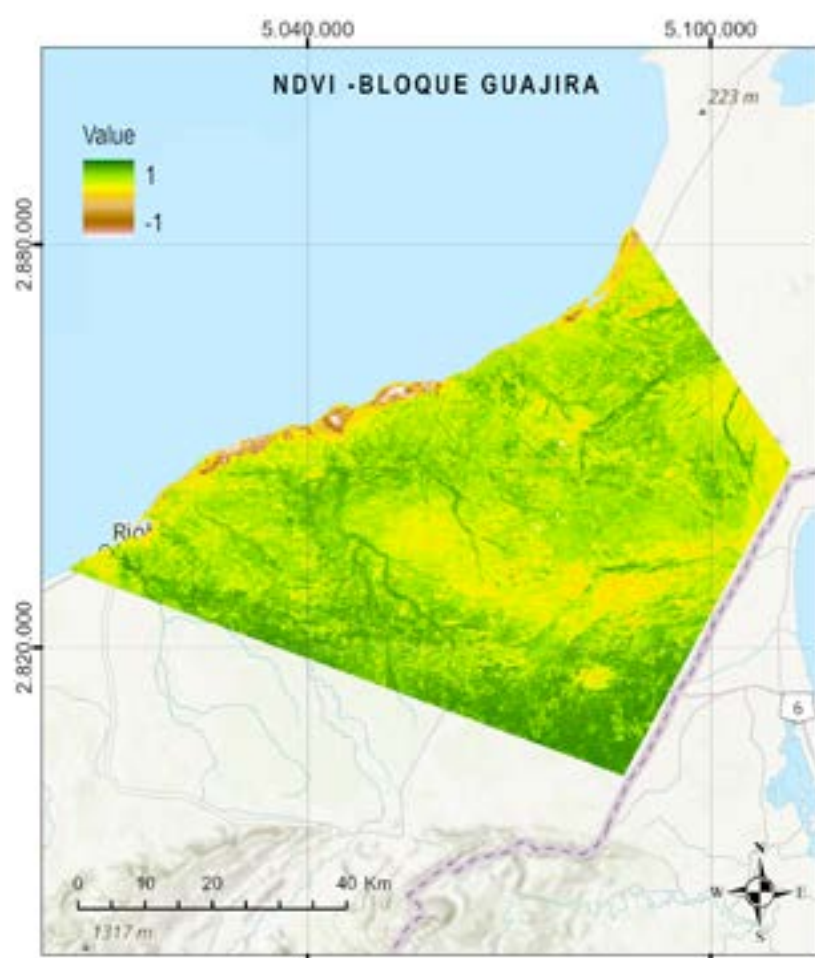


Figura 6.1. Ejemplos de índices espectrales de vegetación, a partir de imágenes de los satélites Landsat 8 y Sentinel-2. De izquierda a derecha: NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) en el Bloque 1, Guajira; NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada) en el Bloque 6, Trinidad; EVI (Índice Mejorado de Vegetación) en el Bloque 2, VIM-Cesar.

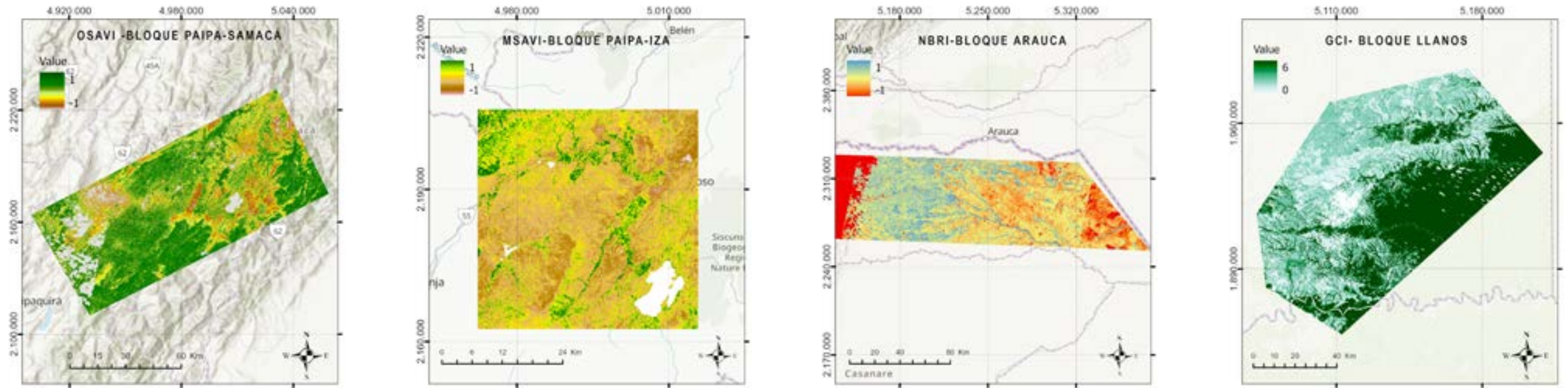


Figura 6.1. Ejemplos de índices espectrales de vegetación, a partir de imágenes de los satélites Landsat 8 y Sentinel-2 (continuación). De izquierda a derecha: **OSAVI** (Índice Optimizado de Vegetación Ajustado al Suelo) en el Bloque 5, Paipa-Samacá; **MSAVI** (Índice Modificado de Vegetación Ajustado al Suelo) en el Bloque 8, CO-Paipa-Iza; **NBRI** (Índice de Relación de Quemado Normalizada) en el Bloque 4, Arauca; y **GCI** (Índice de Clorofila Verde) en el Bloque 7, Llanos.

Por ejemplo, imagínese una región con actividad geotérmica intensa. Allí, el calor expulsado desde el subsuelo, la liberación de gases como dióxido de carbono y la presencia de agua asociada a zonas de alteración hidrotermal, pueden modificar la vegetación. Al analizar esta región con índices de vegetación, el NDVI podría mostrar valores altos (>0.7), lo que indicaría vegetación vigorosa; mientras que el NDWI revelaría valores bajos (<0.2), sugiriendo estrés hídrico. Esto puede deberse a la influencia del calor o a gases subterráneos, que generan condiciones particulares en el suelo y en las raíces de las plantas. Dicha combinación permitiría priorizar esta zona para estudios más detallados, evidenciando la utilidad de los índices en la identificación de patrones relevantes para la evaluación geotérmica y ambiental.

Gracias a estas herramientas, se puede comprender mejor cómo la vegetación interactúa con su entorno, dando pistas sobre las condiciones del suelo, la disponibilidad de agua y hasta la actividad geotérmica en el subsuelo. Esto convierte a los índices de vegetación en aliados indispensables para los estudios ambientales y la toma de decisiones informada en el manejo de recursos naturales.

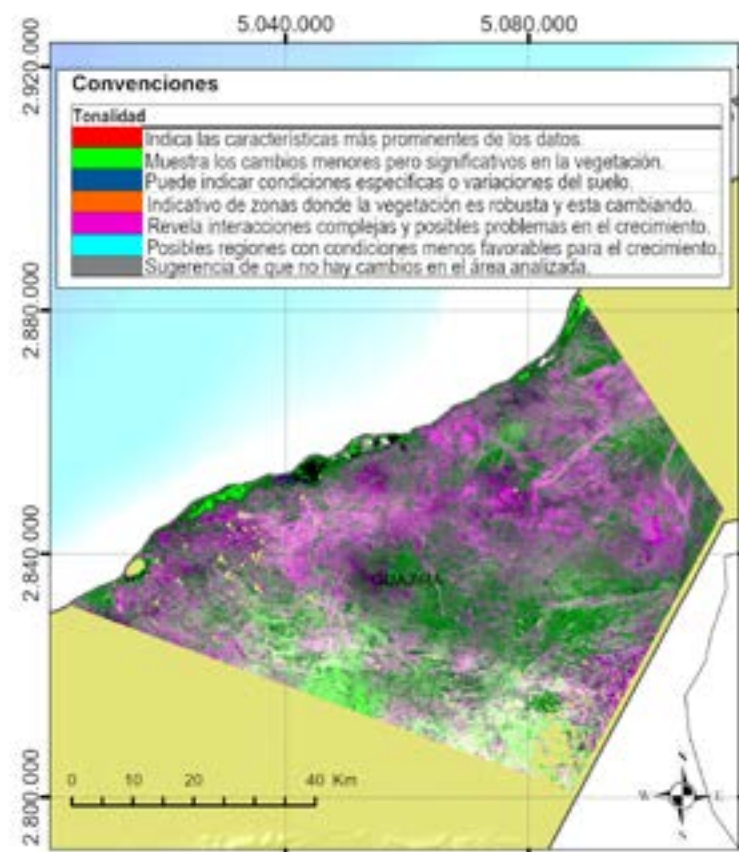


Figura 6.2. ACP. Bloque 1, Guajira.

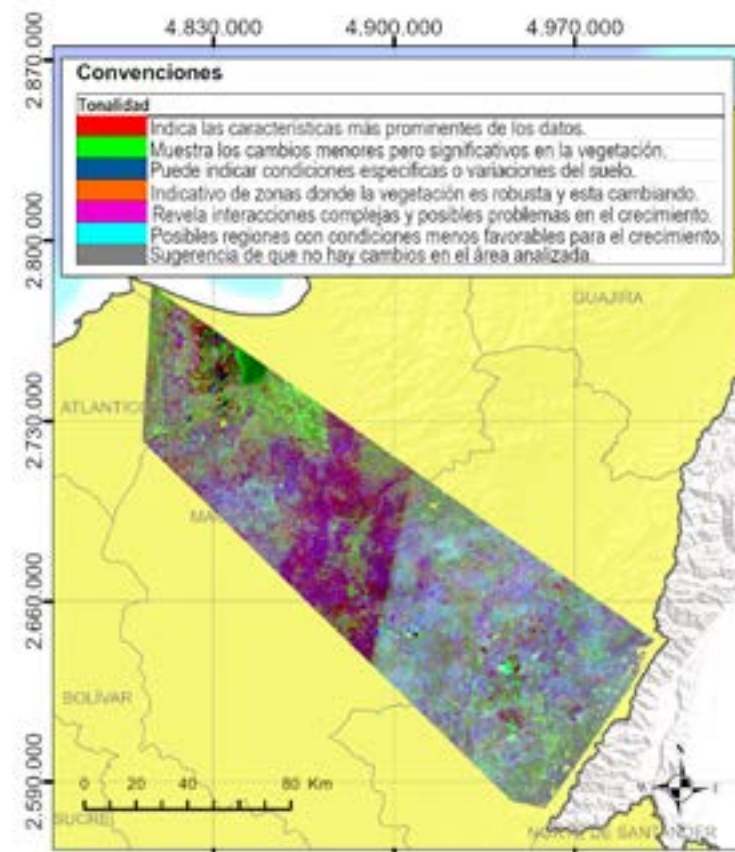


Figura 6.3. ACP. Bloque 2, VIM-Cesar.

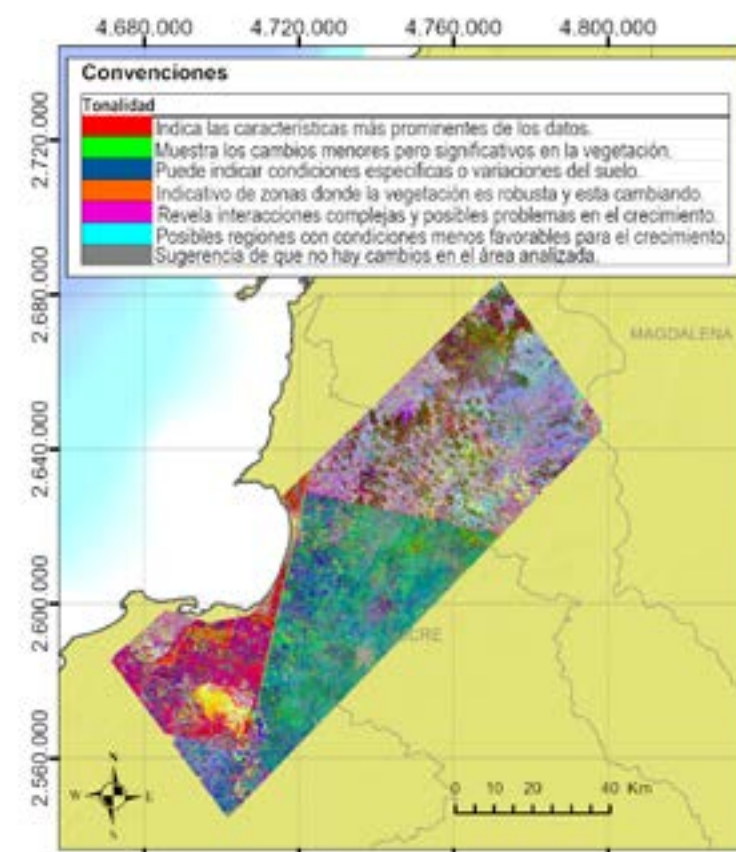


Figura 6.4. ACP. Bloque 3, Morrosquillo-Cansona.

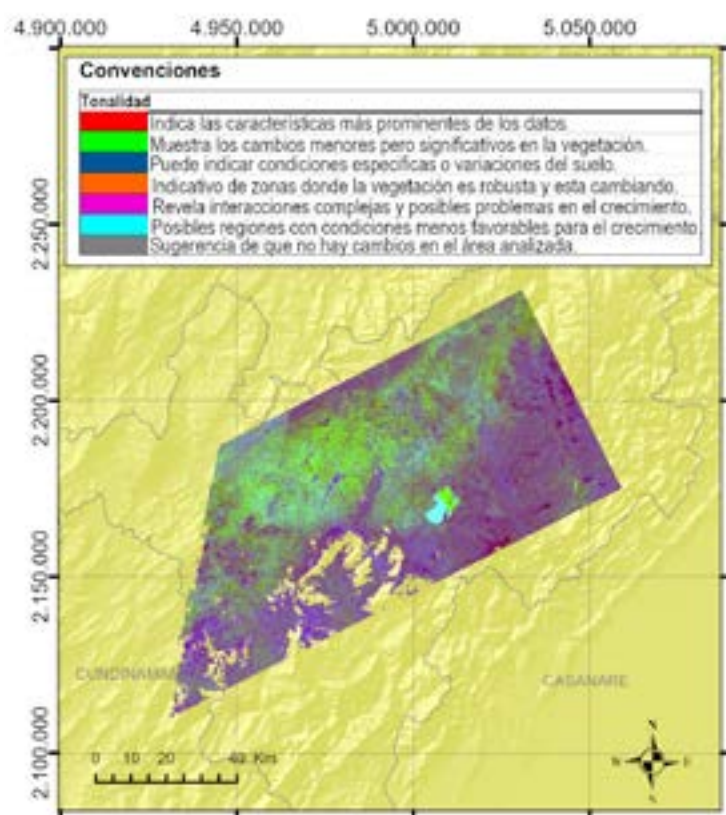


Figura 6.5. ACP. Bloque 5, Paipa-Samacá.

Análisis de Componentes Principales (ACP)

Es una técnica matemática utilizada para simplificar conjuntos de datos complejos. En términos simples, el PCA identifica patrones en los datos y los reorganiza en "componentes principales", que son combinaciones lineales de las variables originales. Este proceso permite reducir la cantidad de información a analizar, preservando los aspectos más relevantes y facilitando la interpretación de los resultados. En el análisis de índices de vegetación, el PCA se utilizó para evaluar las variaciones espaciales y temporales de índices como el NDVI, NDWI, EVI, entre otros. Al combinar la información de múltiples índices, el PCA permite identificar patrones clave, como zonas donde la vegetación presenta respuestas diferentes debido a factores ambientales o geotérmicos. Este enfoque es particularmente valioso para priorizar áreas de interés y resaltar las características distintivas de cada región estudiada.

Los resultados del PCA suelen representarse mediante mapas de colores que visualizan la distribución de los principales patrones detectados. Las tonalidades en estos mapas reflejan distintas combinaciones de índices de vegetación, facilitando la

interpretación de las dinámicas vegetativas en el área de estudio. A partir de las tonalidades observadas en los bloques priorizados, es posible realizar interpretaciones preliminares sobre las características ambientales y geotérmicas de la región:

- **Tonalidades cálidas (rojo, naranja, amarillo):** indican áreas con mayor actividad o cambios vegetativos significativo.
- **Tonalidades frías (azul, verde):** Representan áreas de vegetación más estable, menor actividad o suelos descubiertos.
- **Tonalidades neutras (grises):** Señalan regiones con poca variación o patrones uniformes, donde los índices no destacan anomalías específicas.
- **Tonalidades magenta:** Resaltan áreas con combinaciones específicas de índices, que podrían asociarse a condiciones mixtas como vegetación en transición, suelo expuesto con vegetación dispersa o zonas alteradas por cambios ambientales sutiles.

Estas tonalidades permiten identificar rápidamente anomalías o patrones particulares, guiando el análisis hacia áreas con potencial geotérmico o dinámicas vegetativas interesantes.

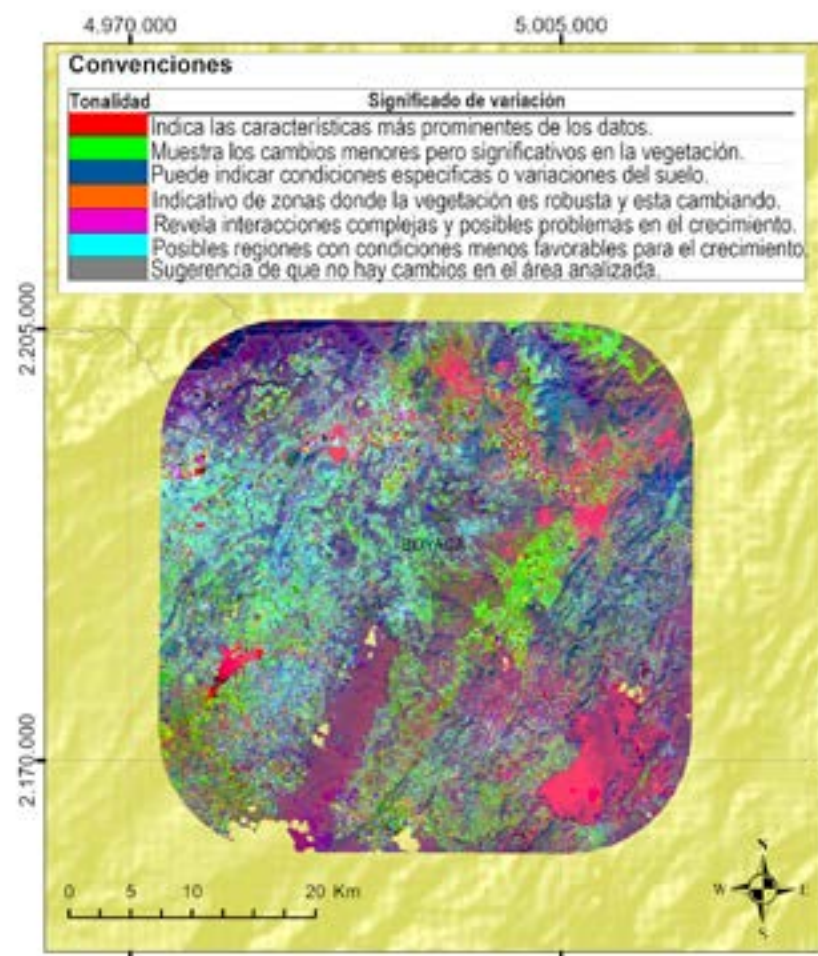


Figura 6.6. ACP. Bloque 8, CO-Paipa-Iza.

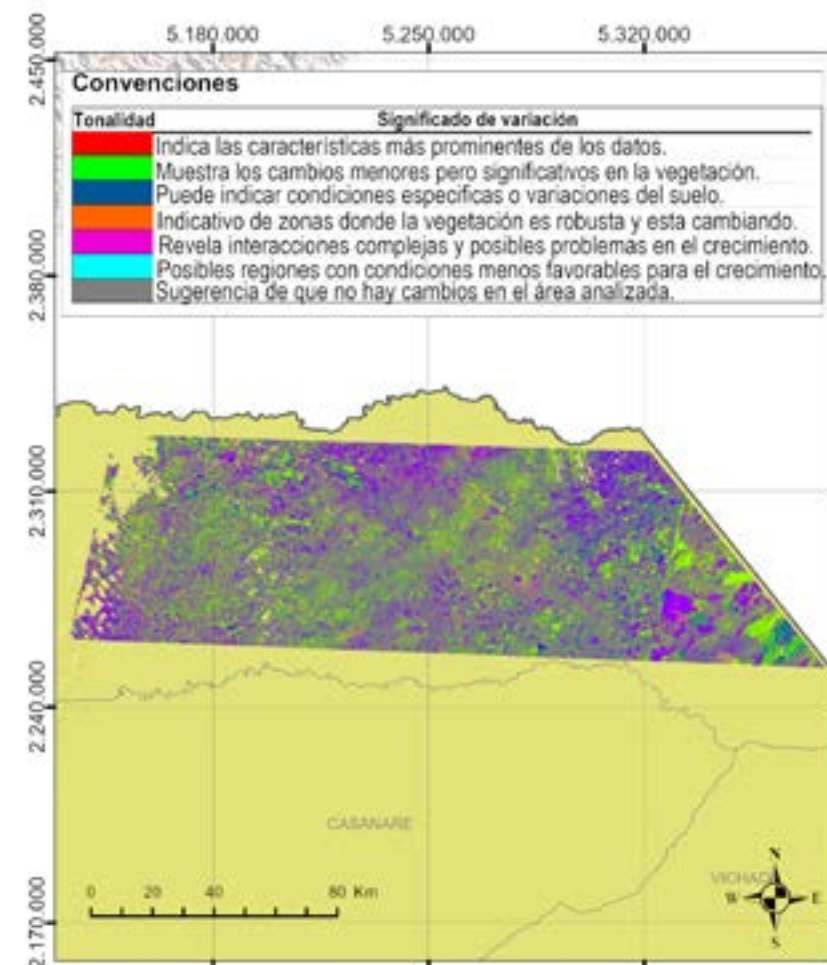


Figura 6.7. ACP. Bloque 4, Arauca.

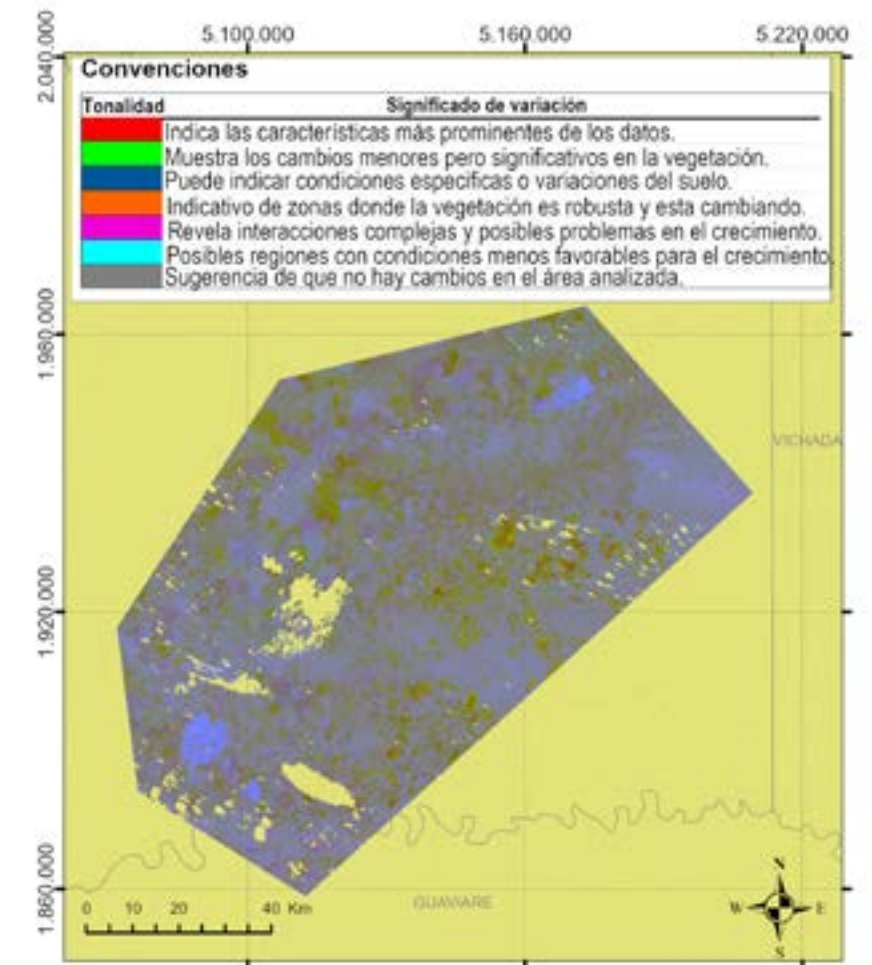


Figura 6.8. ACP. Bloque 7, Llanos.

En los análisis de PCA realizados para el bloque correspondiente a la zona de Paipa-Iza, conocida por sus antecedentes hidrotermales, los resultados destacan áreas de alta prioridad identificadas por tonalidades rojas y magenta. Estas tonalidades reflejan patrones vegetativos prominentes y complejos. Las alteraciones observadas en la vegetación podrían estar asociadas a variaciones en la temperatura del suelo, emisión de gases o fluctuaciones en la disponibilidad de agua subterránea, características típicas de zonas con actividad geotérmica. Estas áreas destacan como candidatas prioritarias para estudios detallados, dada la relación directa entre las condiciones geotérmicas y los cambios detectados en los índices de vegetación.

En el bloque de Arauca, los resultados del PCA indican una prioridad moderada, con predominancia de tonalidades magenta y verde. Estas tonalidades sugieren interacciones complejas en la vegetación, posiblemente relacionadas con variaciones en el suelo, niveles de humedad o la presencia de vegetación en transición. Aunque los patrones observados no son tan destacados como en Paipa-Iza, ciertas zonas específicas podrían estar influenciadas por procesos ambientales o cambios vegetativos regionales, que merecen un análisis más profundo.

En el bloque de Llanos, los resultados reflejan una menor prioridad, caracterizada por tonalidades azules claras y grises, que indican estabilidad o cambios mínimos en la vegetación. Esto sugiere que las condiciones vegetativas en este bloque son menos dinámicas o están menos afectadas por factores externos significativos, como posibles procesos geotérmicos. Aunque no se considera una prioridad inmediata, este bloque sirve como referencia para contrastar con áreas de mayor actividad, estableciendo una línea base de condiciones vegetativas más estables.

Este análisis resalta la utilidad del PCA como herramienta para priorizar bloques según su respuesta espectral y su relación con condiciones geotérmicas. Así, permite guiar futuros estudios hacia las zonas con mayor potencial y complejidad ambiental, optimizando los esfuerzos en la exploración geotérmica.

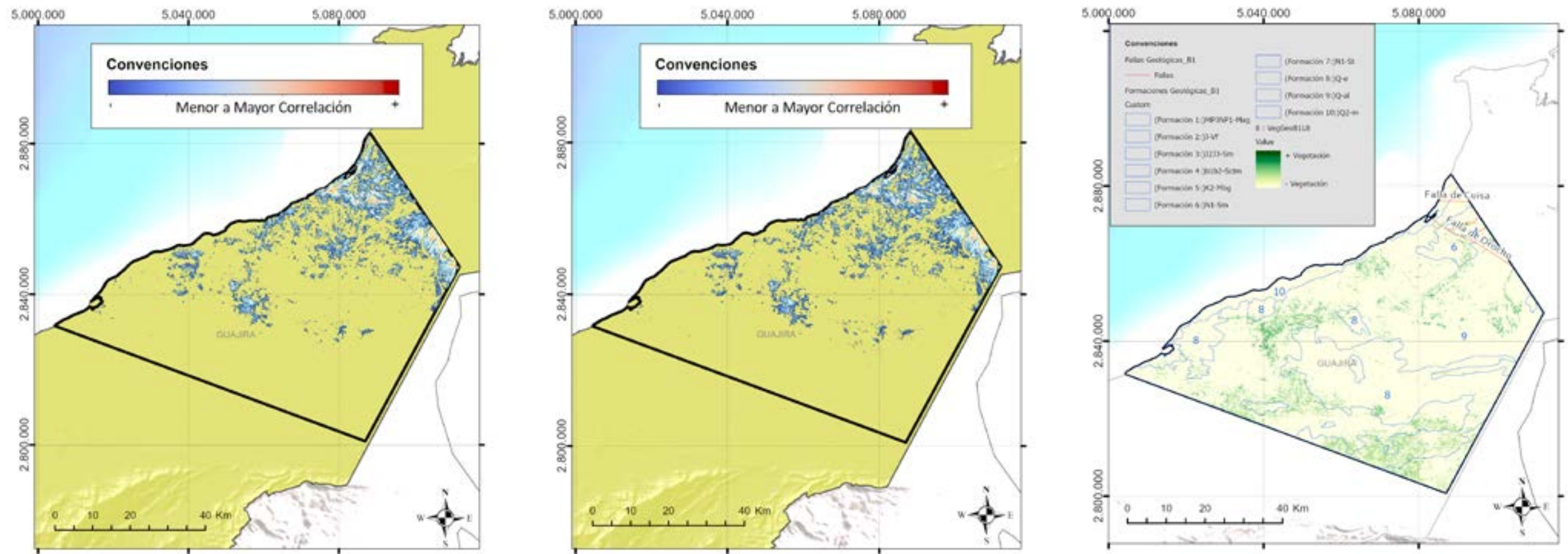


Figura 6.9. Correlaciones entre índices de vegetación y temperatura superficial (izquierda), flujo de calor (centro), y características geológicas (derecha), correspondientes al Bloque 1, Guajira.

Bloque 1, Guajira

Mapa de correlación temperatura superficial: Los resultados evidencian una relación significativa entre los componentes principales PCA de los índices de vegetación y la temperatura superficial. Las áreas con alta correlación positiva se concentran predominantemente en la región norte del bloque. Este patrón sugiere que las variaciones en la vegetación están estrechamente relacionadas con incrementos en la temperatura superficial, posiblemente vinculados a procesos subyacentes de origen geotérmico.

Adicionalmente, se identificaron zonas dispersas en el centro del bloque con correlaciones positivas moderadas. Estas podrían reflejar la influencia de factores térmicos locales, como heterogeneidades en la conductividad térmica del suelo o variaciones en la profundidad del flujo de calor.

Mapa de correlación flujo de calor: El análisis del flujo de calor revela áreas con correlaciones positivas destacadas en el noreste del bloque. Estas zonas parecen estar directamente

influenciadas por la actividad endógena subterránea, lo que se refleja en la respuesta de la vegetación, particularmente en índices sensibles como el NDWI y el MSAVI. En contraste, las áreas periféricas del suroeste muestran bajas correlaciones, lo que sugiere una menor interacción entre el flujo de calor y las características vegetativas en estas regiones.

Mapa de Índices de Vegetación-Geología: La superposición de las formaciones geológicas con el mapa promedio de vegetación revela que las zonas aluviales recientes (formación Q-al) exhiben los valores más altos de índices de vegetación (~25%), lo que indica condiciones favorables de humedad y fertilidad del suelo. En contraste, las formaciones consolidadas, como la K2-Mbg, muestran valores inferiores al 5%, sugiriendo limitaciones edáficas que restringen el crecimiento vegetal. Además, se observa que las principales fallas geológicas coinciden con cambios abruptos en los índices de vegetación, lo que podría reflejar interacciones entre la estructura geológica y la cobertura vegetal.

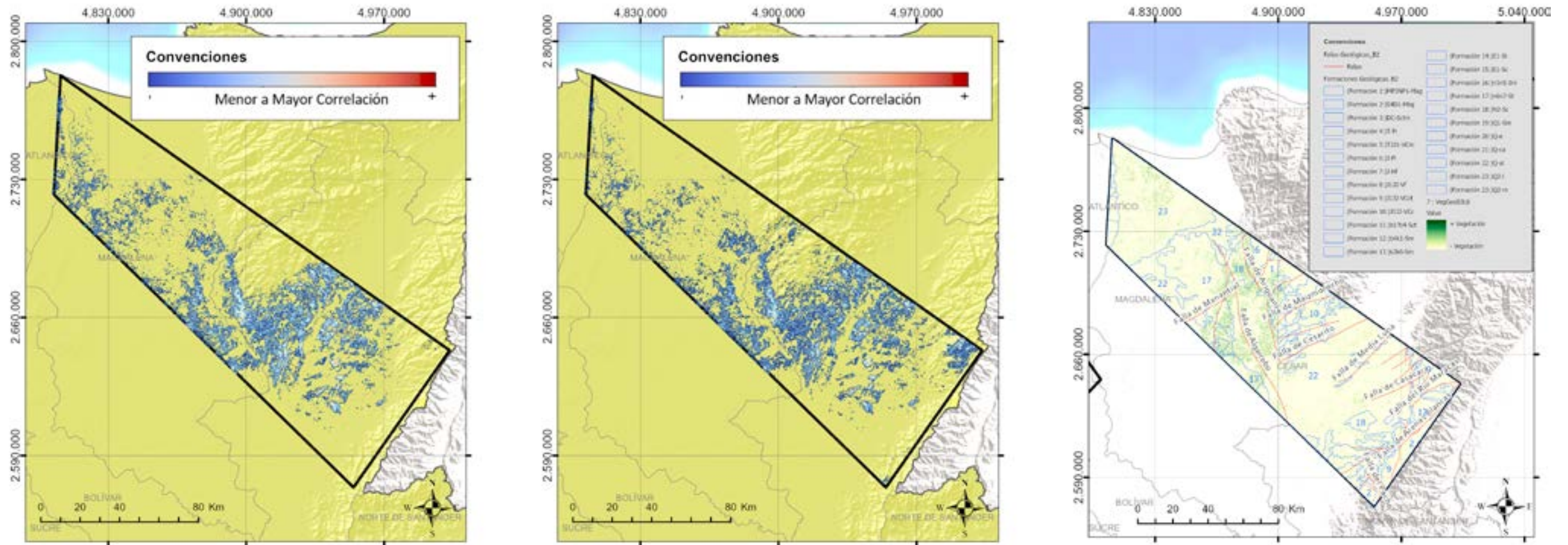


Figura 6.10. Correlaciones entre índices de vegetación y temperatura superficial (izquierda), flujo de calor (centro), y características geológicas (derecha), correspondientes al Bloque 2, VIM-Cesar.

Bloque 2, VIM-Cesar

Mapa de correlación temperatura superficial: Las zonas de mayor correlación positiva con la temperatura superficial siguen un patrón similar al del flujo de calor, aunque con una mayor dispersión hacia el centro-sur del bloque. Esto sugiere que el calentamiento superficial, posiblemente relacionado con procesos térmicos locales o variaciones en la radiación solar, también influye en la dinámica de la vegetación. Las correlaciones negativas observadas en las áreas periféricas indican que la vegetación en estas zonas podría estar limitada por condiciones edáficas más restrictivas.

Mapa de correlación flujo de calor: En el bloque VIM-César, las áreas de alta correlación positiva entre el flujo de calor y los PCA de índices de vegetación se concentran principalmente en las zonas centrales y hacia el sur del bloque. Estas áreas destacan por la probable influencia de procesos geotérmicos en el subsuelo, los cuales alteran tanto la humedad del suelo como la

estructura de la vegetación. Las respuestas más sensibles se observan en los índices que reflejan las zonas donde el flujo de calor interactúa más directamente con la vegetación. En contraste, las áreas periféricas muestran valores de correlación bajos, lo que indica una menor interacción entre estas variables.

Mapa de Índices de Vegetación-Geología: La integración de las formaciones geológicas con el promedio de los índices de vegetación destaca que las formaciones recientes, como Q-al y Q-c, presentan los valores más altos (20-30%), lo que sugiere suelos más ricos en nutrientes y una mayor capacidad de retención de humedad. En contraste, las formaciones consolidadas, como K2-Mbg y J-Hf, muestran valores bajos (<10%), lo que indica limitaciones para el crecimiento vegetal debido a la compactación y baja fertilidad del suelo. Además, se observa que las principales fallas geológicas coinciden con cambios en los índices de vegetación, lo que podría reflejar una interacción entre las estructuras geológicas y la cobertura vegetal.

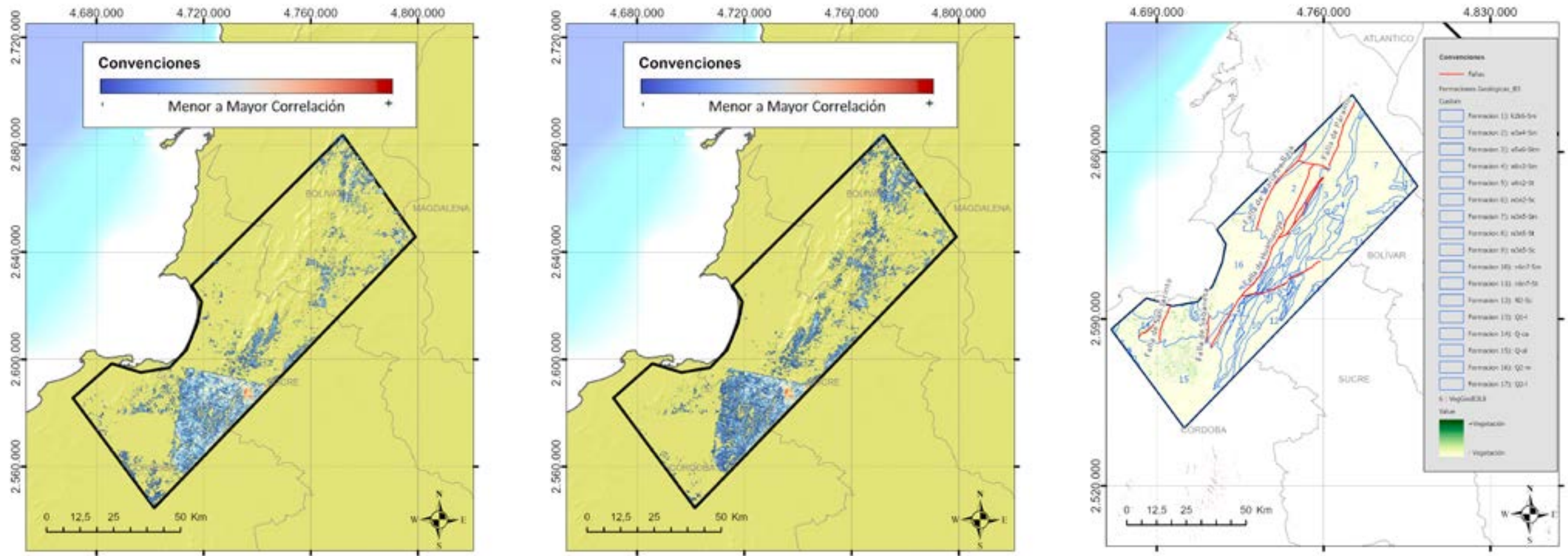


Figura 6.11. Correlaciones entre índices de vegetación y temperatura superficial (izquierda), flujo de calor (centro), y características geológicas (derecha), correspondientes al Bloque 3, Morrosquillo-Cansona.

Bloque 3, Morrosquillo-Cansona

Mapa de correlación temperatura superficial: Las zonas de alta correlación positiva con la temperatura superficial se concentran principalmente en el suroeste del bloque, alineándose con las áreas destacadas en el análisis de flujo de calor. Sin embargo, también se identifican correlaciones dispersas hacia el centro, que podrían estar relacionadas con procesos climáticos locales o variaciones en la radiación solar. Las áreas con correlaciones negativas sugieren que la vegetación podría estar limitada por factores edáficos más restrictivos o condiciones menos favorables.

Mapa de correlación flujo de calor: En el bloque Morrosquillo-Cansona, las áreas de alta correlación positiva entre el flujo de calor y los PCA de índices de vegetación se concentran en el sector suroeste. Estas zonas reflejan una probable interacción entre el flujo de calor del

subsuelo y la respuesta de la vegetación, posiblemente influenciada por gradientes geotérmicos significativos. Las respuestas más destacadas se observan en índices que capturan cambios relacionados con la humedad y la cobertura vegetal. En contraste, las áreas con baja correlación en el centro y norte del bloque indican una menor interacción térmica en estas zonas.

Mapa de Índices de Vegetación-Geología: El análisis de las formaciones geológicas revela que las unidades recientes, como Q-al y Q-c, presentan los valores promedio más altos de índices de vegetación (~11-12%), lo que indica condiciones favorables de suelos aluviales ricos en nutrientes y con alta capacidad de retención de agua. Por otro lado, formaciones consolidadas como K2k6-Sm y N2-Sc muestran los valores más bajos (<5%), sugiriendo suelos compactos y de baja fertilidad, menos propicios para el desarrollo vegetal.

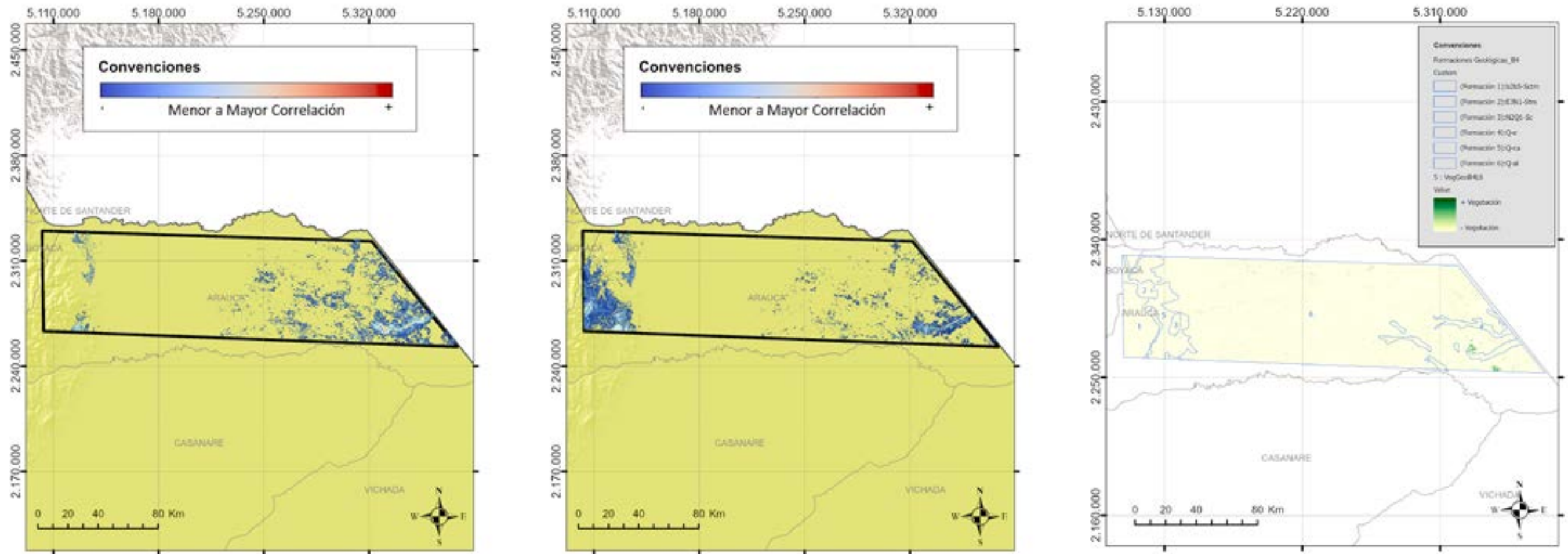


Figura 6.12. Correlaciones entre índices de vegetación y temperatura superficial (izquierda), flujo de calor (centro), y características geológicas (derecha), correspondientes al Bloque 4, Arauca.

Bloque 4, Arauca

Mapa de correlación temperatura superficial: Las zonas de alta correlación con la temperatura superficial se distribuyen principalmente en el sector noreste y en algunas áreas dispersas en el centro del bloque. Estas correlaciones sugieren que las variaciones de temperatura superficial podrían estar influyendo en la vegetación, probablemente debido a la transferencia de calor desde el suelo hacia las capas superiores. En contraste, el suroeste presenta correlaciones bajas, reflejando condiciones térmicas más estables o con menor influencia geotérmica.

Mapa de correlación flujo de calor: En el bloque Arauca, las áreas con alta correlación positiva entre el flujo de calor y los PCA de índices de vegetación se localizan principalmente en el

noreste del bloque. Estas zonas destacan como puntos de posible interacción entre los procesos térmicos del subsuelo y la vegetación superficial, reflejando respuestas específicas en los índices de vegetación. Las áreas con baja correlación, concentradas hacia el suroeste, indican una menor influencia térmica, posiblemente debido a condiciones ambientales externas que reducen la interacción con el flujo de calor.

Mapa de Índices de Vegetación-Geología: El análisis geológico destaca que las formaciones aluviales recientes, como Q-e y Q-al, presentan los valores más altos de índices de vegetación (~3%), lo que indica suelos ricos en nutrientes y con alta retención de humedad, favorables para el desarrollo vegetal. Por otro lado, las formaciones consolidadas como E3N1-Stm y b2b5-Sctm muestran valores bajos (<0.5%), reflejando suelos compactos con baja fertilidad. Este patrón se correlaciona con la interacción limitada entre la geología estructural y las condiciones vegetativas.

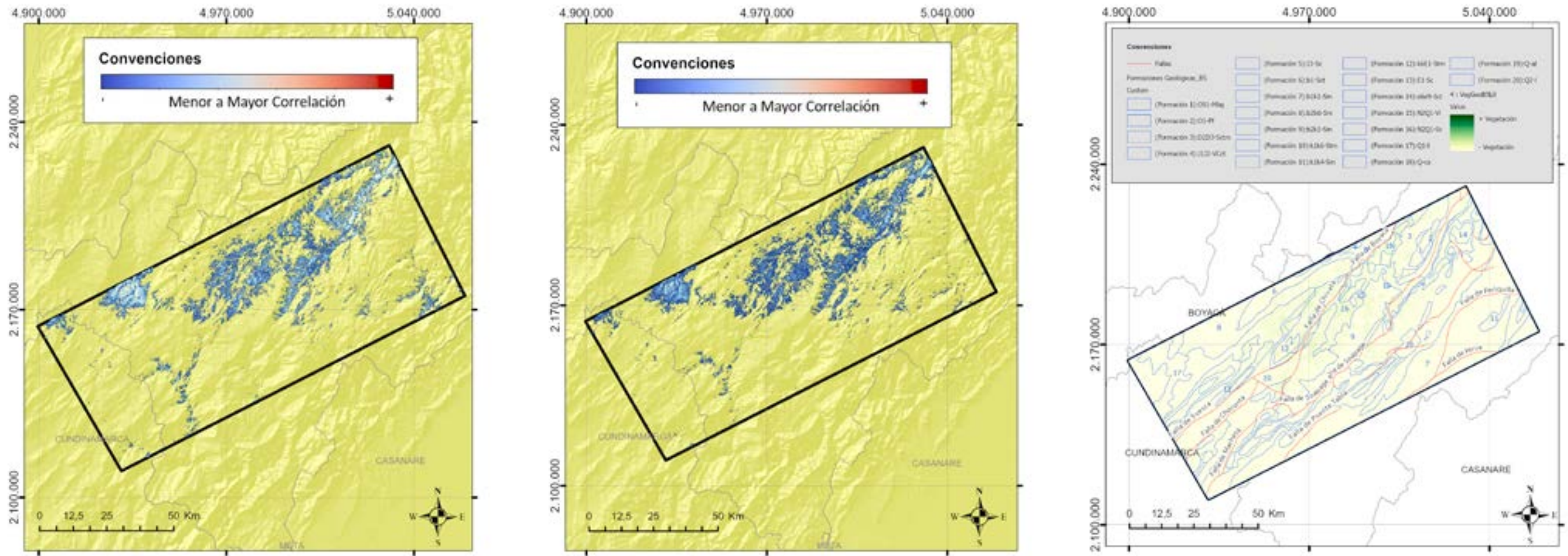


Figura 6.13. Correlaciones entre índices de vegetación y temperatura superficial (izquierda), flujo de calor (centro), y características geológicas (derecha), correspondientes al Bloque 5, Paipa-Samacá.

Bloque 5, Paipa-Samacá

Mapa de correlación temperatura superficial: Las zonas de alta correlación con la temperatura superficial se concentran en el noreste del bloque, coincidiendo con las áreas de mayor actividad térmica superficial. Estas correlaciones sugieren que las variaciones de temperatura superficial afectan la dinámica de la vegetación, probablemente debido a procesos de transferencia de calor desde el subsuelo. Las áreas con correlaciones moderadas, ubicadas en el centro-sur del bloque, reflejan una influencia térmica menos directa, mientras que los extremos este y oeste presentan correlaciones bajas, lo que indica una mayor estabilidad térmica o una menor influencia geotérmica.

Mapa de correlación flujo de calor: En el bloque Paipa-Samacá, las áreas con alta correlación positiva entre el flujo de calor y los PCA de índices de vegetación se localizan principalmente en

el noreste del bloque. Estas zonas coinciden con estructuras geológicas y fallas que facilitan la transferencia de calor hacia la superficie, lo que se refleja en las respuestas vegetativas influenciadas por procesos térmicos subyacentes. En contraste, las áreas con baja correlación, concentradas en los márgenes occidentales, sugieren una menor interacción térmica, posiblemente debido a condiciones geológicas más consolidadas que atenúan el flujo de calor.

Mapa de Índices de Vegetación-Geología: El análisis geológico revela que las formaciones recientes, como E1-Sc y Q-al, presentan los valores más altos de índices de vegetación (~19.8% y 4.81%, respectivamente), lo que indica suelos ricos en nutrientes y con alta capacidad de retención de humedad, lo cual favorece el desarrollo vegetal. Por el contrario, las formaciones consolidadas, como J1 J2-VCct y Q-l1, muestran valores bajos (<0.5%), lo que refleja condiciones menos favorables para la vegetación debido a su compactación y baja fertilidad.

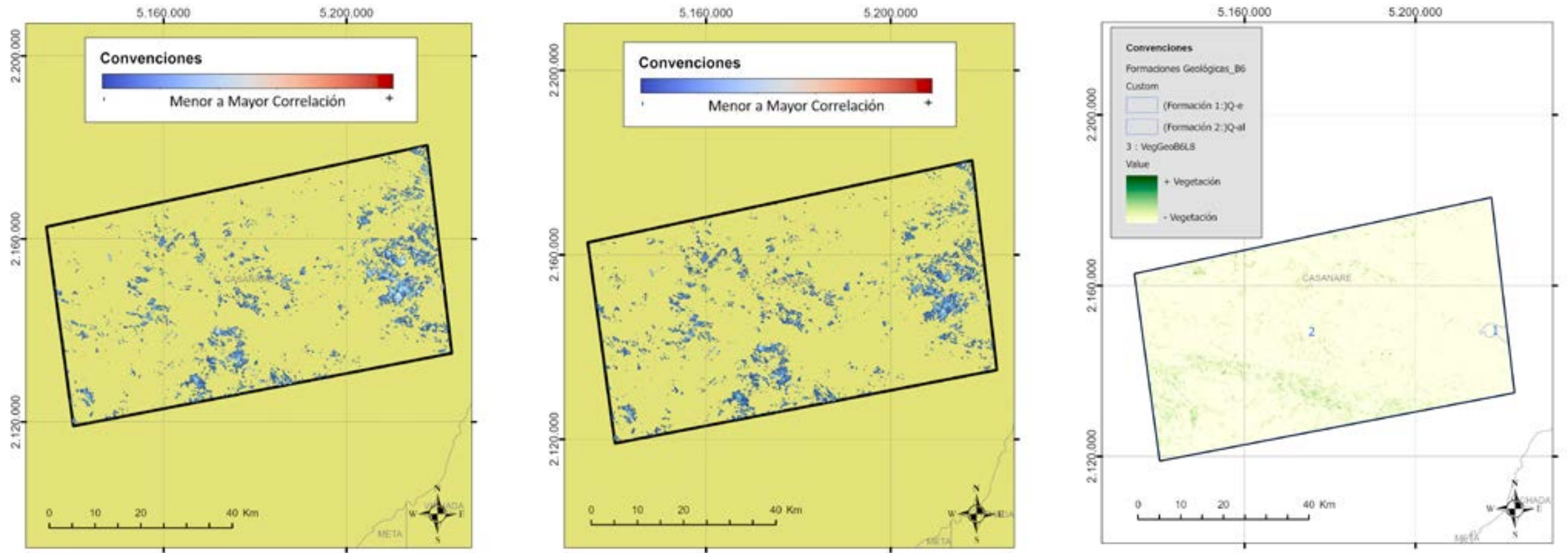


Figura 6.14. Correlaciones entre índices de vegetación y temperatura superficial (izquierda), flujo de calor (centro), y características geológicas (derecha), correspondientes al Bloque 6, Trinidad.

Bloque 6, Trinidad

Mapa de correlación temperatura superficial: El análisis del bloque Trinidad muestra patrones de correlación similares a los observados en el flujo de calor. Las correlaciones están distribuidas uniformemente, lo que refuerza la idea de un entorno térmico pasivo, con influencia predominante de factores externos. Algunas zonas dispersas en el noreste del bloque presentan correlaciones ligeramente más altas, lo que podría estar asociado a variaciones en la cobertura vegetal debido a microclimas locales.

Mapa de correlación flujo de calor: En el bloque Trinidad, no se observan concentraciones significativas de correlación positiva entre el flujo de calor y los PCA de índices de vegetación. Las correlaciones están distribuidas de manera homogénea a lo largo del bloque, con valores promedio. Esta dispersión refleja la ausencia de focos térmicos marcados o gradientes significativos

relacionados con actividad geotérmica activa. No obstante, en el centro del bloque, algunas áreas presentan correlaciones moderadas, lo que podría estar vinculado a factores superficiales, como la humedad del suelo o características climáticas locales.

Mapa de Índices de Vegetación-Geología: En el análisis geológico, las formaciones identificadas, Q-al y Q-e, presentan un contraste claro en sus promedios de índices de vegetación. La formación Q-al lidera con un promedio de 5.07%, lo que indica condiciones favorables para la retención de humedad y el desarrollo biológico. En contraste, Q-e muestra un promedio significativamente menor de 0.91%, lo que probablemente está relacionado con características litológicas restrictivas que limitan la actividad fotosintética y la retención de nutrientes.

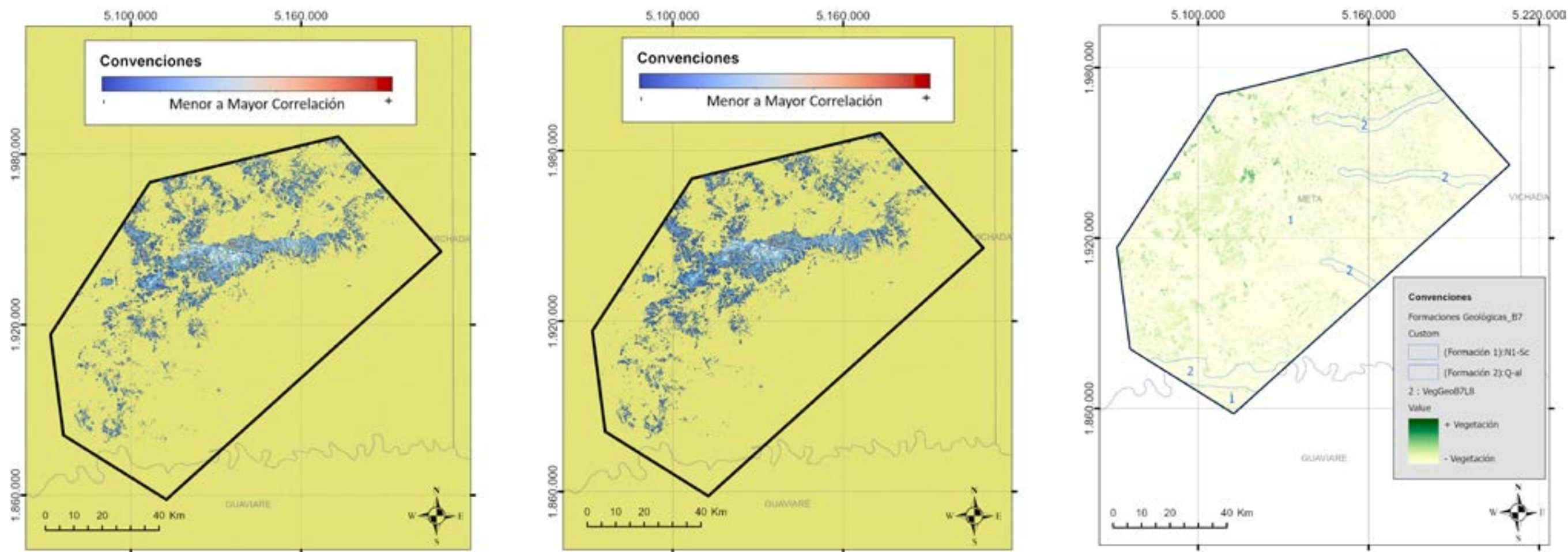


Figura 6.15. Correlaciones entre índices de vegetación y temperatura superficial (izquierda), flujo de calor (centro), y características geológicas (derecha), correspondientes al Bloque 7, Llanos.

Bloque 7, Llanos

Mapa de correlación temperatura superficial: En el bloque Llanos, los valores de correlación entre el flujo de calor y el PCA de los índices de vegetación se distribuyen de manera homogénea. No se identifican áreas con una alta concentración de correlaciones que puedan asociarse con actividad térmica significativa. En el centro-sur del bloque, se observan sectores con ligeras variaciones, alcanzando valores marginalmente superiores, lo que podría estar vinculado a procesos superficiales que interactúan con la cobertura vegetal. Este patrón sugiere la ausencia de fenómenos geotérmicos subyacentes que impacten de manera significativa la vegetación.

Mapa de correlación flujo de calor: En el bloque Llanos, los valores de correlación entre el flujo de calor y el PCA de los índices de vegetación se distribuyen de manera homogénea. No se identifican áreas con alta concentración de correlaciones que puedan asociarse con actividad

térmica significativa. En el centro-sur del bloque se detectan sectores con ligeras variaciones, alcanzando valores marginalmente superiores posiblemente vinculados a procesos superficiales que interactúan con la cobertura vegetal. Este patrón sugiere una ausencia de fenómenos geotérmicos subyacentes que impacten significativamente la vegetación.

Mapa de Índices de Vegetación-Geología: El análisis geológico indica que la formación sedimentaria N1-Sc presenta el promedio más alto de índices de vegetación (9.76), lo que sugiere condiciones favorables para el crecimiento vegetal, probablemente debido a su capacidad para acumular agua y nutrientes. En contraste, la formación Q-a muestra un promedio inferior (7.47), lo que refleja condiciones menos favorables, posiblemente debido a una menor capacidad de retención de agua o una mayor compactación del suelo. Esta diferencia en los promedios resalta la influencia de las características edáficas en la distribución y densidad de la vegetación en la región.

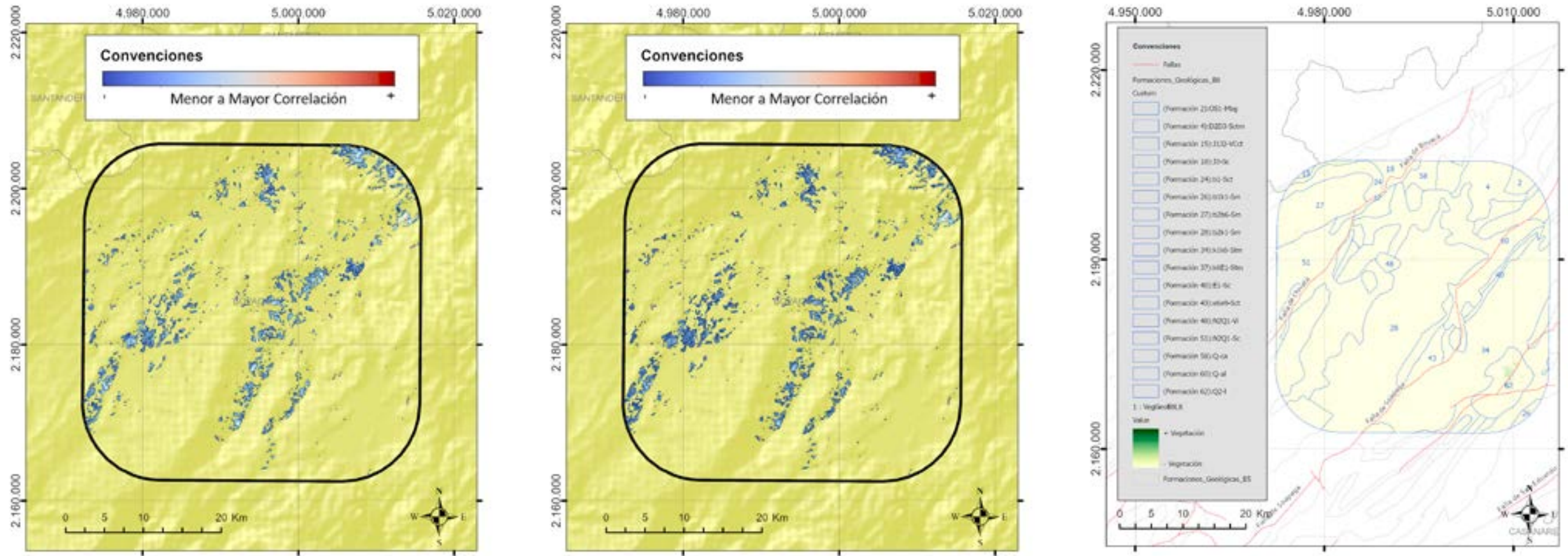


Figura 6.16. Correlaciones entre índices de vegetación y temperatura superficial (izquierda), flujo de calor (centro), y características geológicas (derecha), correspondientes al Bloque 8, CO-Paipa-Iza.

Bloque 8, CO-Paipa-Iza

Mapa de correlación temperatura superficial: El análisis de la correlación con la temperatura superficial muestra valores altos en el sector noreste del bloque, áreas asociadas con suelos de mayor conductividad térmica y alta retención de calor. En el centro del bloque, se observan correlaciones dispersas pero significativas, lo que refuerza la presencia de anomalías térmicas relacionadas con la actividad hidrotermal. En los márgenes del bloque, las correlaciones son más bajas, lo que podría atribuirse a condiciones térmicas estables y a la ausencia de actividad hidrotermal significativa.

Mapa de correlación flujo de calor: En el bloque Paipa-Iza, las áreas con alta correlación positiva se concentran principalmente en el centro y este del bloque. Estas zonas coinciden con regiones de actividad hidrotermal conocida y sistemas de fallas activos, lo que sugiere una

interacción directa entre el flujo de calor subterráneo y las respuestas vegetativas en superficie. Las áreas con correlación moderada se localizan en el suroeste, indicando zonas periféricas con menor interacción térmica y gradientes térmicos más bajos.

Mapa de Índices de Vegetación-Geología: La mayoría de las formaciones geológicas en el bloque Paipa-Iza presentan promedios bajos de índices de vegetación, concentrándose en valores inferiores a 1.5. Esto incluye formaciones como D2D3-Sctm y Q-al, que están clasificadas como "bajas". Estas áreas se caracterizan por litologías compactas y condiciones menos favorables para el desarrollo vegetal, como baja retención de humedad y propiedades mineralógicas restrictivas. En contraste, la formación J1J2-VCct destaca con un promedio de 6.2, lo que sugiere condiciones más favorables para la vegetación, posiblemente debido a su composición superficial, que facilita la acumulación de materia orgánica y humedad.



CAPÍTULO 6.1 ÍNDICES ESPECTRALES DE VEGETACIÓN PLANESCOPE

- **NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada):** Es uno de los índices más utilizados para evaluar la densidad de la vegetación. Mide la diferencia entre la reflectancia en las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y el rojo (RED), destacando áreas con alta actividad fotosintética y mayor biomasa.
- **EVI (Índice Mejorado de Vegetación):** Similar al NDVI, pero optimizado para minimizar los efectos del suelo y la atmósfera. Es especialmente útil en áreas de vegetación densa, donde proporciona información más precisa sobre el vigor vegetativo.
- **ARVI (Índice Ajustado de Vegetación para Atmósfera):** Diseñado para corregir los efectos de aerosoles y partículas en suspensión, como polvo o humo, que pueden afectar la reflectancia en la banda roja. Es ideal para áreas volcánicas o regiones con alta actividad atmosférica.

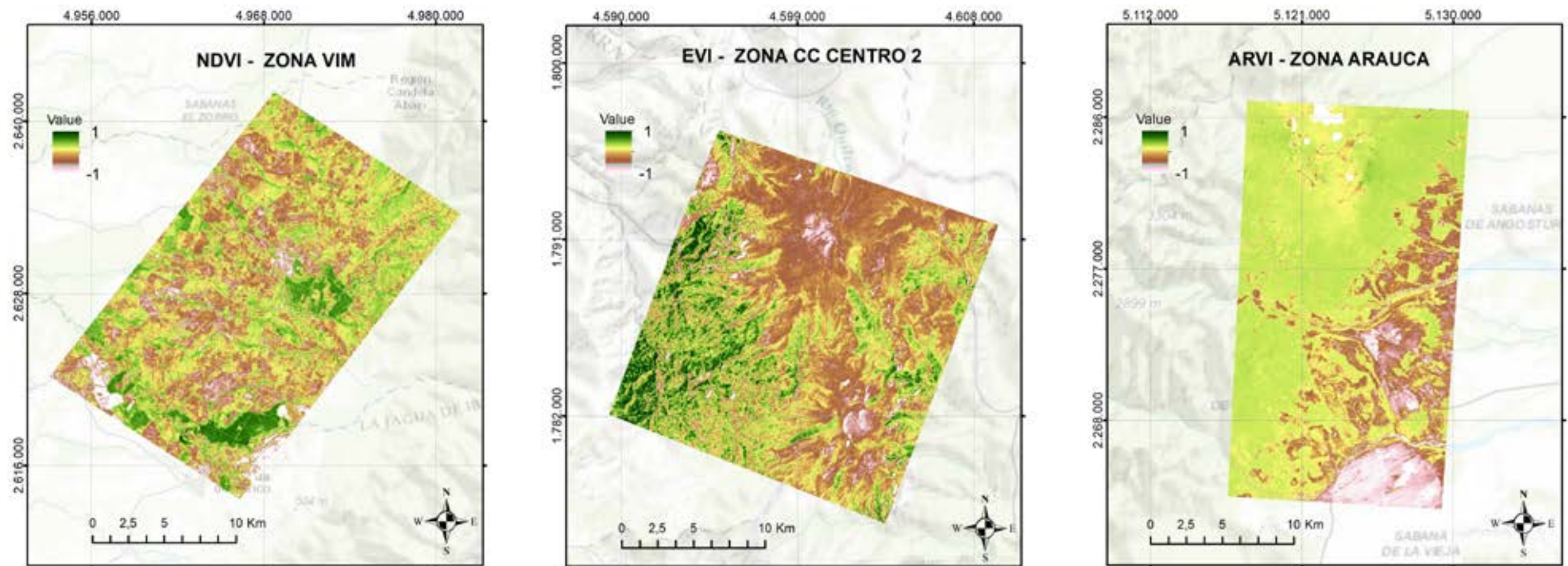


Figura 6.17 • Índices de Vegetación Planetscope, NDVI (Izquierda), EVI (Centro), ARVI (Derecha)



- DVI (Índice de Diferencia Vegetal): Evalúa la diferencia directa entre la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) y la banda roja (RED). Aunque más simple que otros índices, es eficaz para medir la biomasa relativa.
- NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada): Evalúa la humedad de la vegetación mediante la comparación entre la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) y la banda verde (GREEN). Detecta estrés hídrico y cambios en el contenido de agua en las hojas.
- SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo): Una variante del NDVI que incorpora un factor de ajuste para reducir los efectos del suelo en áreas con baja cobertura vegetal. Es particularmente útil en regiones semiáridas o con suelos parcialmente descubiertos.

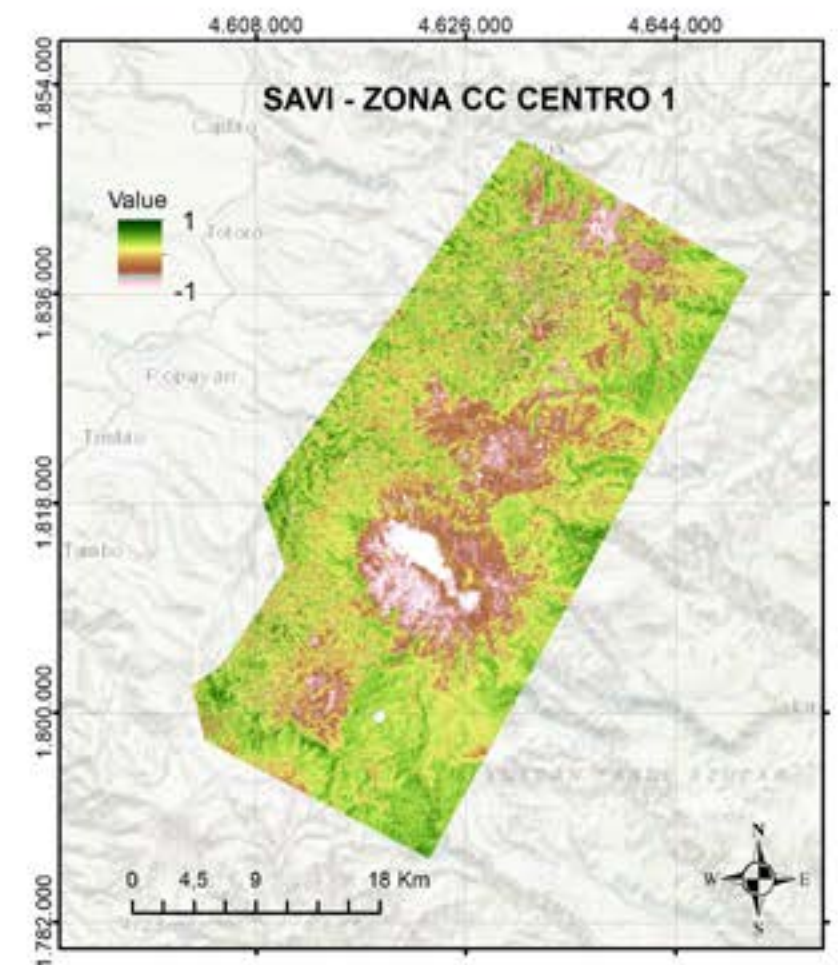
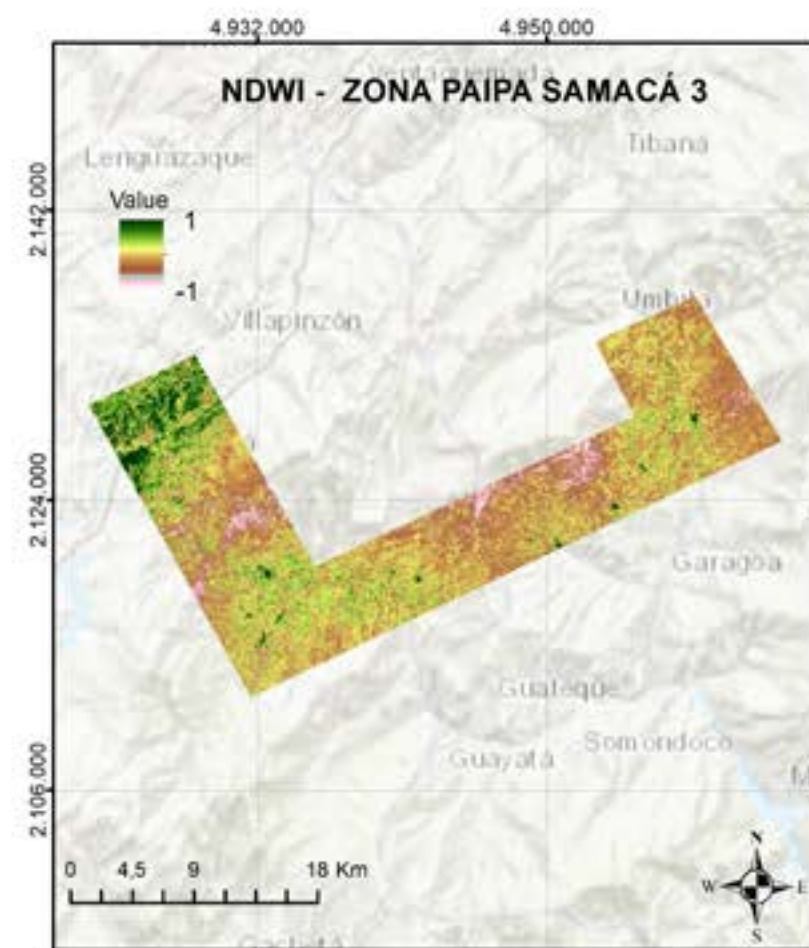
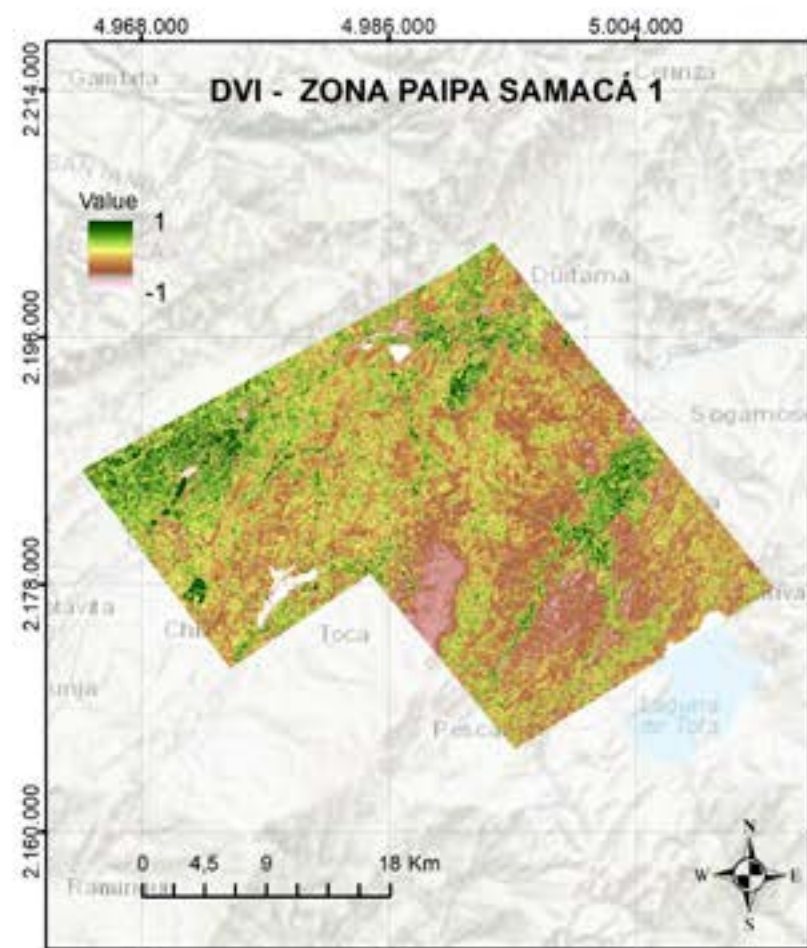


Figura 6.18 • Índices de Vegetación Planetscope, DVI (Izquierda), NDWI (Centro), SAVI (Derecha)



- PVI (Índice de Vegetación Perpendicular): Calcula la distancia perpendicular entre un punto espectral y una línea de referencia en el espacio de bandas rojo e infrarrojo cercano. Esto permite discriminar áreas con mayor biomasa, independientemente del suelo.

- NSAVI (Índice Normalizado Ajustado al Suelo): Una mejora del SAVI que ajusta dinámicamente el parámetro de corrección del suelo en función de las condiciones locales, proporcionando resultados más precisos en entornos heterogéneos.

- GLI (Índice de Verdor Global): Mide la proporción de verde en la vegetación mediante un análisis de las bandas azul, verde y roja. Es útil para evaluar la clorofila y la salud general de la vegetación.

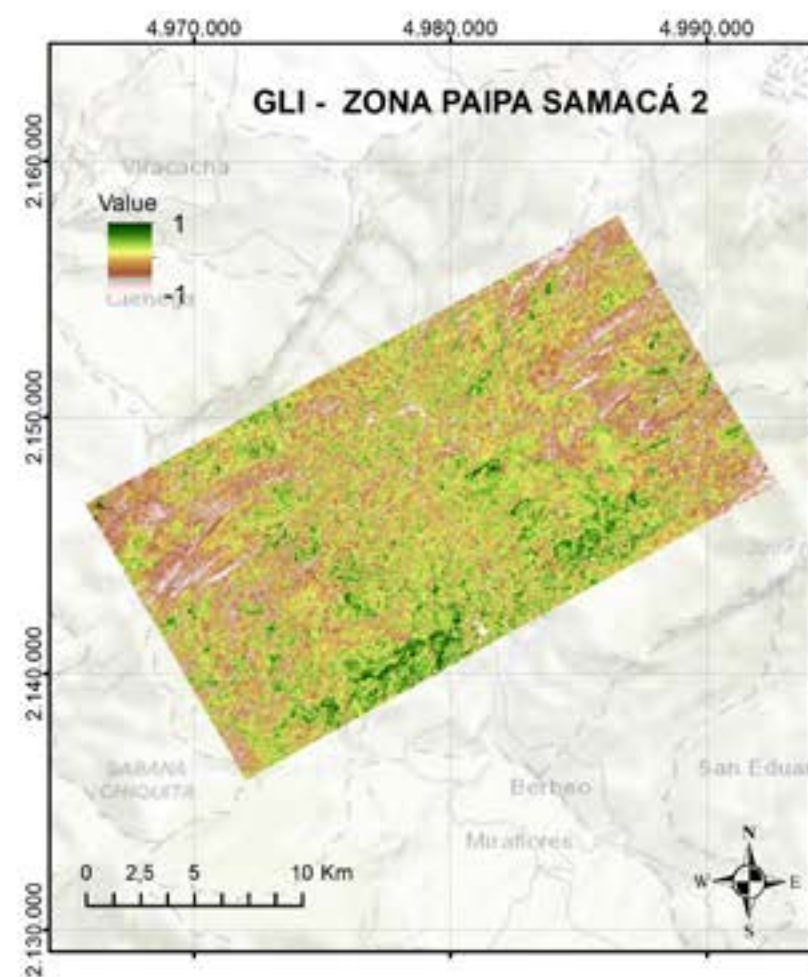
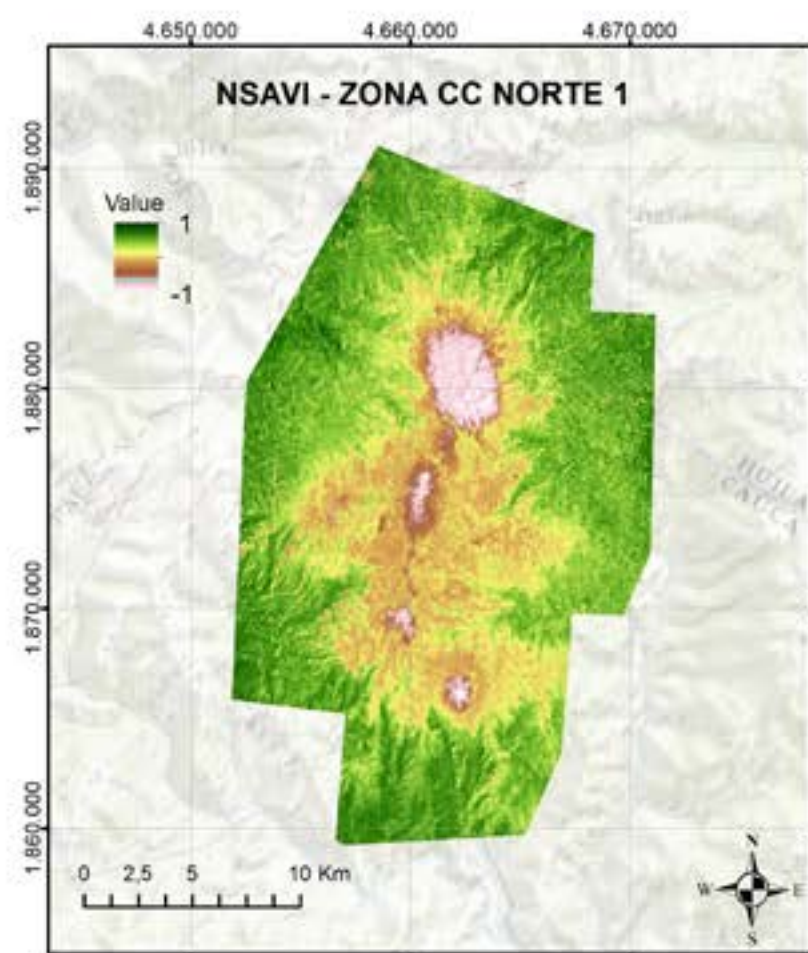
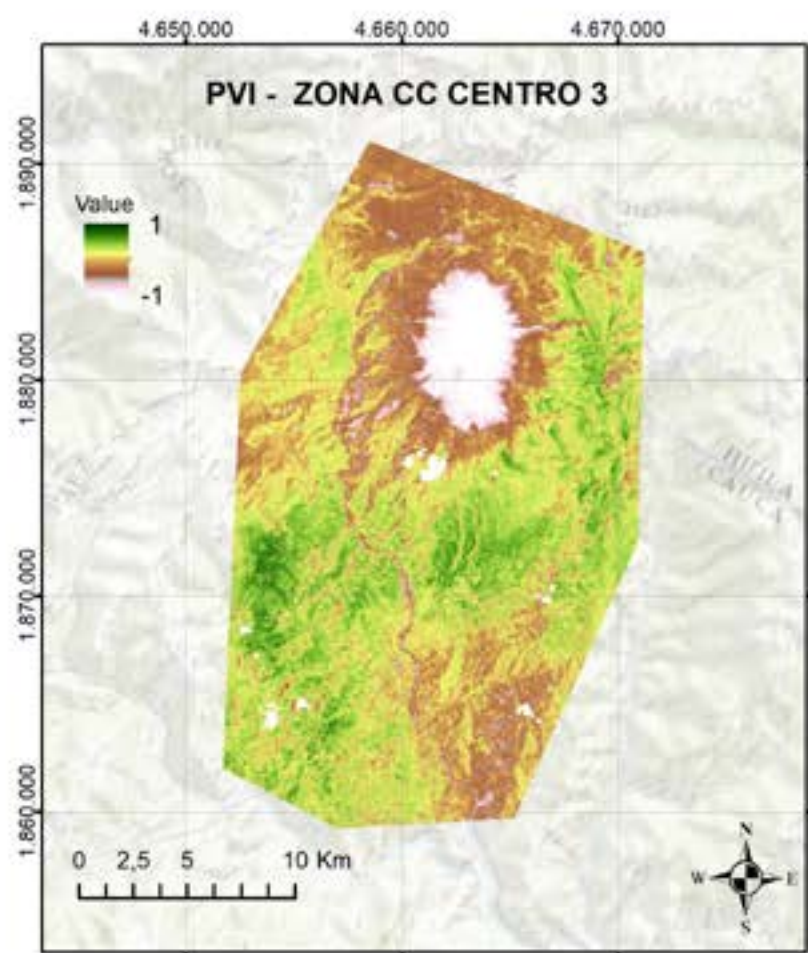


Figura 6.19 • Índices de Vegetación Planetscope, PVI (Izquierda), NSAVI (Centro), GLI (Derecha)



The background is a solid green color. It features a series of thin, white, concentric circles of varying radii that overlap each other. Additionally, there is a faint white grid consisting of vertical and horizontal lines that intersect to form a pattern of squares across the entire image.

CONCLUSIONES



Flujo de Calor (GHF) – Temperatura superficial (LST)

Primera:

Las anomalías positivas de Temperatura Superficial Terrestre (LST) y Flujo de Calor Geotérmico (GHF) identificadas en los bloques CC-Centro, CC-Norte y Bloque CO Paipa-Iza están estrechamente relacionadas con las características geológicas y estructurales subyacentes. Los valores elevados en estos parámetros sugieren la existencia de un sistema de transferencia de calor activo desde las capas profundas hacia la superficie. Estas manifestaciones térmicas se asocian principalmente con zonas de debilidad estructural, como sistemas de fallas, fracturas y discontinuidades en el basamento rocoso, que funcionan como conductos preferenciales para el ascenso de fluidos geotermales.

El flujo de estos fluidos calientes a través de estructuras permeables transfiere calor a las rocas circundantes, alcanzando niveles superficiales y generando las anomalías térmicas observadas. La coincidencia espacial entre estas anomalías y las intersecciones de fallas geológicas mayores, así como lineamientos estructurales regionales, refuerza la hipótesis de su origen geotérmico. Adicionalmente, la presencia de manifestaciones termales superficiales, como manantiales calientes, fumarolas y alteración hidrotermal en estos bloques, proporciona evidencia complementaria de un sistema geotérmico activo en profundidad.

En conclusión, las anomalías positivas de LST y GHF se interpretan como indicadores superficiales de la actividad geotérmica subyacente. Las estructuras geológicas presentes en estas áreas actúan como vías preferenciales para la transferencia de calor desde los reservorios profundos hacia la superficie, confirmando el alto potencial geotérmico de estas zonas para su aprovechamiento energético.

Segunda:

Las anomalías positivas de Temperatura Superficial Terrestre (LST) y Flujo de Calor Geotérmico (GHF) identificadas en los bloques

Arauca, VIM-Cesar y Llanos presentan características destacadas desde el punto de vista geotérmico y estructural. Estas anomalías térmicas elevadas parecen estar estrechamente relacionadas con la configuración geológica regional, incluyendo la presencia de cuencas sedimentarias profundas y sistemas de fallas regionales que actúan como controladores principales.

En el bloque Arauca, los valores anómalos de LST y GHF podrían estar asociados a acuíferos profundos que presentan gradientes geotérmicos anómalos, posiblemente influenciados por cuerpos intrusivos ubicados en el basamento. Estas condiciones podrían favorecer la transferencia de calor hacia la superficie a través de fracturas y fallas.

En el bloque VIM-Cesar, las anomalías térmicas se correlacionan con la actividad tectónica vinculada al sistema de fallas de la Cordillera Oriental y la Sierra Nevada de Santa Marta. La deformación estructural y el adelgazamiento cortical en esta región parecen facilitar el ascenso de fluidos calientes desde niveles profundos, lo que refuerza la importancia de las estructuras tectónicas como canales preferenciales para la circulación de fluidos geotermales.

En el bloque Llanos, las anomalías térmicas parecen estar controladas por la interacción entre la configuración de las cuencas sedimentarias y los sistemas de fallas regionales. En particular, las secuencias sedimentarias gruesas actúan como capas sello, reteniendo el calor en profundidad y permitiendo su manifestación en superficie a través de zonas de debilidad estructural.

La correlación espacial entre las anomalías térmicas y las principales estructuras tectónicas en estas regiones subraya el papel fundamental de los sistemas de fallas como conductos de transferencia de calor. Además, la acumulación de calor en secuencias sedimentarias profundas sugiere la presencia de sistemas geotermales profundos que podrían ser caracterizados y aprovechados para



aplicaciones energéticas. En este contexto, los bloques VIM-Cesar y Arauca destacan como los más prometedores, dada la magnitud de sus anomalías de LST y GHF, así como las condiciones estructurales favorables que presentan.

Tercera:

Las zonas seleccionadas en los bloques estudiados destacan como los prospectos más prometedores para la exploración geotérmica, dado que presentan una convergencia de múltiples indicadores favorables. En Paipa-Iza, la correlación espacial entre franjas de alta temperatura superficial (LST) y un flujo de calor geotérmico (GHF) elevado (55.75 W/m^2), junto con la presencia de alteraciones argílicas y la asociación mineralógica de clorita, illita y montmorillonita, evidencia un sistema hidrotermal activo. Este sistema parece estar controlado por estructuras geológicas principales que favorecen la circulación de fluidos.

En el bloque CC-Norte, aunque los valores de LST están parcialmente definidos, el máximo GHF registrado (75.40 W/m^2) y la presencia de alteraciones argílicas con mineralización de epidota, clorita y alunita son indicativos de procesos hidrotermales de alta temperatura, típicos de ambientes volcánicos activos.

El bloque CC-Centro presenta una relación directa entre sus valores de LST ($20\text{-}35^\circ\text{C}$), un GHF de 45.81 W/m^2 y la presencia de minerales indicadores como clorita, epidota y azufre. Estos datos sugieren un sistema geotermal vinculado a la actividad volcánica del complejo Puracé.

En VIM-Cesar, la coincidencia de anomalías térmicas superficiales con un GHF de 46.69 W/m^2 , alteraciones propilíticas y la presencia de montmorillonita y caolinita indica un sistema conductivo controlado estructuralmente.

Finalmente, el bloque Arauca muestra un gradiente térmico significativo ($6\text{-}32^\circ\text{C}$) y un GHF de 30.82 W/m^2 . Este escenario, acompañado de alteraciones propilíticas y mineralización de montmorillonita e illita, señala la existencia de un sistema geotermal de

menor entalpía, pero con potencial para su aprovechamiento.

La integración de estos indicadores no solo confirma la presencia de sistemas geotermales activos, sino que también aporta información clave sobre sus características y mecanismos de transferencia de calor. Particularmente, los prospectos de Paipa-Iza y CC-Norte se perfilan como los más prometedores, dada la intensidad y distribución de las anomalías, lo que sugiere sistemas geotermales más robustos y económicamente viables para su aprovechamiento energético.

ALTERACIONES HIDROTERMALES Y MINERALES DE ALTERACIÓN PARA ATLAS.

Las zonas de alteración hidrotermal se identificaron mediante el procesamiento de imágenes satelitales de los sensores Landsat-8, Sentinel-2 y ASTER, empleando el método de Análisis de Componentes Principales (PCA). Los minerales de alteración se determinaron a través del análisis multispectral de las mismas imágenes, procesadas con la técnica de clasificación Spectral Angular Mapper (SAM). Para cada bloque, se realiza una descripción de las zonas de alteración y los minerales asociados, los cuales serán validados mediante trabajo de campo y análisis de laboratorio.

Bloque Guajira

En el bloque Guajira, ubicado en el extremo norte de Colombia, se identificaron zonas de alteración hidrotermal que incluyen alteración argílica a argílica avanzada, así como alteración filica y propilítica hacia el sur del bloque. Estas zonas están asociadas con la presencia de minerales arcillosos como montmorillonita, illita y caolinita, vinculados a la meteorización de rocas volcánicas y metamórficas de la región. La presencia de hematita se interpreta como resultado de depósitos cuaternarios, donde los procesos de erosión y meteorización han transportado minerales de las secuencias metamórficas.



Fotografía: Jaír Ramírez Cadena



Bloque VIM-Cesar

El bloque VIM-Cesar, que abarca los departamentos del Atlántico, Magdalena y Cesar, presenta alteraciones hidrotermales de tipo argílico, fílico y propilítico, con minerales característicos como illita, caolinita, montmorillonita, hematita y goetita. La presencia de óxidos de hierro está relacionada con procesos de enfriamiento, interacción fluido-roca y/o meteorización de rocas ígneas o sedimentarias. En las proximidades de Becerril, donde se encuentra la manifestación termal El Azufrado, se identifican alteraciones propilíticas y argílicas con desarrollo de montmorillonita y caolinita, lo que sugiere la presencia de procesos hidrotermales asociados a temperaturas moderadas.

Bloque Morrosquillo-Cansona

El bloque Morrosquillo-Cansona, que abarca los departamentos de Bolívar, Magdalena y Córdoba, presenta áreas de alteración hidrotermal de tipo argílica, argílica avanzada, fílica y propilítica. Los minerales detectados mediante análisis multiespectral incluyen arcillosos como caolinita, montmorillonita e illita, que están posiblemente asociados con zonas de meteorización de rocas sedimentarias. Asimismo, se identificó la presencia de óxidos como hematita y goetita, y en algunos sectores, se detectó moscovita.

Bloque Arauca

Por otro lado, el bloque Arauca localizado en el oriente de colombiano incluye los departamentos de Arauca y parte este de Boyacá presenta facies argílicas, propilíticas, fílicas y potásicas, con minerales clave como illita, montmorillonita, caolinita, goetita y hematita. Estas asociaciones sugieren sistemas geotérmicos de baja a media temperatura con potencial para su aprovechamiento.

Bloque Paipa-Samacá

“En el bloque Paipa-Samacá, que abarca la región central de los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, se identificaron alteraciones hidrotermales de tipo argílica, argílica

avanzada, fílica, propilítica y potásica. Las alteraciones localizadas en la zona central, entre Tunja y Sogamoso, son particularmente significativas debido a la presencia de rocas volcánicas y domos relacionados con el área geotérmica de Paipa. Hacia el norte, en municipios como Tasco, Socha y Corrales, predominan las alteraciones fílicas, mientras que al sur, en el sector de Zetaquirá, se identifican principalmente alteraciones propilíticas.

El análisis multiespectral permitió identificar minerales como illita, caolinita, montmorillonita, clorita y epidota, asociados a la meteorización y alteración de rocas sedimentarias. De particular interés son las concentraciones de estos minerales cercanas a zonas de fallas, que podrían interpretarse como indicadores de alteración hidrotermal.

Bloque Trinidad

El bloque Trinidad, ubicado en el departamento de Casanare, presenta zonas de alteración hidrotermal de tipo argílica y argílica avanzadas distribuidas en varios sectores del bloque. La alteración propilítica se concentra principalmente en las zonas de drenaje del polígono, mientras que la alteración fílica se identifica en la zona de llanura aluvial y la potásica en depósitos aluviales. Los minerales de alteración detectados mediante análisis multiespectral incluyen illita, montmorillonita, caolinita, y óxidos como hematita y goetita.

Bloque Llanos

El bloque Llanos, ubicado en los departamentos de Meta y Guaviare, se encuentra en un contexto geológico sedimentario. Las alteraciones identificadas corresponden a facies argílicas, argílicas avanzadas y fílicas. Los minerales de alteración determinados incluyen illita, caolinita, montmorillonita, goetita y hematita.

Bloque Paipa-Iza

En el bloque Paipa-Iza, ubicado en la cordillera Oriental del departamento de Boyacá, se han identificado alteraciones hidrotermales



Fotografía: Jair Ramírez Cadena



que abarcan desde facies argílicas hasta argílicas avanzadas, además de sectores con alteraciones fílicas y propilíticas. Esta área es conocida por el Área Geotérmica de Paipa, la cual presenta varias zonas de manifestaciones hidrotermales con un alto potencial para el aprovechamiento de recursos geotérmicos.

Los minerales clave detectados incluyen illita, caolinita, montmorillonita, clorita y epidota. Estas asociaciones minerales están relacionadas con temperaturas de formación de 150 a 200 °C para los minerales arcillosos, y de 200 a 400 °C para la clorita y la epidota. Esto evidencia la presencia de sistemas hidrotermales activos, asociados a interacciones agua-roca a través de zonas de fractura y estructuras geológicas principales.

Bloque CC-Norte

El bloque CC-Norte, ubicado en un contexto volcánico activo de la cordillera Central, donde se encuentra el Parque Nacional Natural de los Nevados, presenta diversas alteraciones hidrotermales, incluyendo facies argílicas, argílicas avanzadas, propilíticas, fílicas y potásicas.

Los minerales identificados a través del análisis multiespectral incluyen illita, caolinita, montmorillonita, clorita, epidota y alunita. Estos minerales están relacionados con temperaturas de formación de 100 a 150 °C para las arcillas y la alunita, y de 200 a 400 °C para la epidota y la clorita.

Estas asociaciones minerales son coherentes con el ambiente hidrotermal del bloque CC-Norte e indican una interacción activa con fluidos geotermiales de alta temperatura, lo que refuerza su relevancia para estudios y aplicaciones geotérmicas.

Bloques CC-Centro

En el bloque CC-Centro, ubicado en la cordillera Central dentro del área del Parque Nacional Natural de Puracé, se identifican facies de alteración hidrotermal que abarcan desde zonas de alteración argílica hasta argílica avanzada, con sectores de alteración propilítica. Esta distribución es consistente con la presencia de sistemas geotermiales de alta temperatura asociados al sistema hidrotermal del volcán Puracé. Los minerales clave

identificados incluyen illita, caolinita, montmorillonita, clorita, epidota y azufre, lo que refuerza la importancia del área para estudios geotérmicos.

Zonas argílicas: Caracterizadas por la presencia de caolinita y montmorillonita, asociadas a un rango de temperatura de 150 a 250 °C.

Zonas fílicas: Relacionadas con la illita, formada en un intervalo de temperaturas entre 150 y 300 °C.

Zonas propilíticas: Identificadas por la clorita y la epidota, que se desarrollan en rangos de temperatura de 200 a 400 °C.

Geobotánica y anomalías Vegetales

El análisis geobotánico realizado integra información geoespacial proveniente de sensores como Landsat 8, Sentinel-2, y otros productos derivados, aplicados en índices de vegetación (NDVI, EVI, NDWI, NBRI, GCI, entre otros). Estos datos fueron utilizados para identificar patrones espectrales y priorizar zonas con anomalías vegetales, permitiendo correlacionar variables geotérmicas y vegetación. Los bloques geotérmicos de mayor interés desde el punto de vista geobotánico incluyen CC-Centro, CC-Norte, Paipa-Iza y Paipa-Samacá, donde se destacan patrones consistentes de interacción entre la vegetación y las condiciones térmicas extremas, respaldando su priorización para estudios más detallados.

Bloque La Guajira

En el bloque La Guajira se identifican anomalías vegetales asociadas a baja actividad fotosintética y estrés ambiental. Estas características se manifiestan en áreas con vegetación dispersa y suelos descubiertos, reflejando un entorno de alta sensibilidad a las condiciones térmicas extremas. Los índices NDVI y EVI demostraron una sensibilidad moderada para evaluar la estabilidad vegetal en este contexto. Desde la perspectiva litológica, predominan formaciones compactas y áridas, que limitan considerablemente el desarrollo de la vegetación. Se recomienda priorizar zonas costeras donde las anomalías vegetales sean más marcadas, especialmente aquellas influenciadas por factores edáficos y térmicos.



Fotografía: Mario Cuellar



Bloque VIM-César

El bloque VIM-César presenta una vegetación resiliente frente a condiciones térmicas moderadas, con actividad fotosintética variable. Los índices EVI y MSAVI resultaron efectivos para identificar áreas de estabilidad vegetal, aunque con menor sensibilidad en comparación con otros bloques. Las formaciones sedimentarias, comunes en esta región, favorecen una retención moderada de humedad que contribuye a una mayor estabilidad vegetal. Se sugiere enfocar estudios en zonas con correlaciones positivas entre la vegetación y el flujo de calor, para identificar áreas con mayor potencial geotérmico.

Bloque Morrosquillo-Cansona

En el bloque Morrosquillo-Cansona se observan altos niveles de estrés hídrico, especialmente en áreas con baja retención de humedad. Los índices EVI y NDWI se destacan como herramientas clave para identificar vulnerabilidades en la vegetación, vinculadas a la pérdida de humedad y el estrés térmico. Las zonas costeras con depósitos superficiales muestran mayores índices de vegetación, mientras que las formaciones compactas reflejan restricciones edáficas. Se recomienda priorizar las áreas costeras con alta sensibilidad hídrica para realizar análisis más específicos.

Bloque Arauca

El bloque Arauca, caracterizado por ecosistemas sabaneros, presenta una alta sensibilidad a condiciones térmicas moderadas, acompañada de una pérdida significativa de humedad. Los índices MSAVI y NBRI reflejan áreas críticas de vulnerabilidad hídrica, mientras que formaciones específicas como Q-e se destacan por sus altos índices vegetativos. Las condiciones edáficas favorables de los depósitos superficiales proporcionan estabilidad relativa en comparación con zonas más compactas. Es recomendable priorizar las áreas con formaciones Q-e para estudios detallados sobre la estabilidad vegetal.

Bloque Paipa-Samacá

En el bloque Paipa-Samacá, ubicado en una región montañosa, se observa una vegetación

resiliente capaz de adaptarse a condiciones térmicas extremas. El índice OSAVI muestra alta sensibilidad positiva en las zonas resilientes, mientras que NBRI identifica áreas vulnerables. Las formaciones litológicas J1J2-VCct ofrecen condiciones edáficas favorables para el desarrollo vegetal, lo que las convierte en prioritarias para el análisis. Se recomienda priorizar zonas con altos índices de adaptabilidad vegetal para estudios avanzados en este bloque.

Bloque Trinidad

El bloque Trinidad alberga ecosistemas sensibles con pérdida significativa de humedad y estrés térmico moderado. Los índices EVI y NDVI resultan relevantes para reflejar vulnerabilidades asociadas a la salud vegetal y condiciones hídricas limitantes. Predominan depósitos superficiales que, aunque favorables para el desarrollo vegetal, son limitados en extensión. Se sugiere evaluar áreas críticas con estrés hídrico para diseñar estrategias de mitigación ambiental.

Bloque Llanos

El bloque Llanos presenta una alta sensibilidad hídrica en sus ecosistemas sabaneros, caracterizados por una cobertura vegetal dispersa. Los índices NDWI y NDVI son indicadores clave de vulnerabilidad frente a la pérdida de humedad y el estrés vegetal. Las condiciones litológicas de los depósitos superficiales proporcionan mejores condiciones para el desarrollo vegetal en comparación con las formaciones compactas. Se recomienda priorizar zonas con depósitos superficiales y alta sensibilidad hídrica para análisis más detallados.

Bloque CO-Paipa-Iza

El bloque CO-Paipa-Iza, ubicado en una región montañosa, exhibe vegetación resiliente que demuestra adaptabilidad a condiciones térmicas intensas. Los índices EVI y GCI destacan como herramientas efectivas para identificar zonas resilientes y críticas, respectivamente. Las formaciones J1J2-VCct son prioritarias debido a sus condiciones edáficas favorables.



REFERENCIAS



- Alfaro, C., Ortiz, I. D. (2011). Inventario Nacional de Manantiales Termales Fase 11. Caldas, Risaralda, Tolima y Nariño. Proyecto SUB09-23 Exploración de Recursos Geotérmicos. Servicio Geológico Colombiano.
- Alfaro, C., Rueda-Gutiérrez, J. B., Casallas, Y., Rodríguez, G., & Malo, J. (2021). Approach to the geothermal potential of Colombia. *Geothermics*, 96, 102169. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102169>
- Browne, P. R. L. (1978). Hydrothermal alteration in active geothermal fields. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 6, 229-250. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.06.050178.001305>
- Calderón, R., & Vargas, G. (2019). Determinación de Prospectos Hidrotermales en la Región Geotérmica de Paipa (Boyacá, Colombia), Utilizando Sensores Remotos y Datos de Campo. Universidad Nacional de Colombia.
- Calderón, R. (2019). Infrarrojo termal en la prospección de fuentes hidrotermales en la región de Paipa-Iza, Boyacá.
- Clark, R. N., King, T. V. V., Kleiwa, M., Swayze, G. A., & Vergo, N. (1990). Spectral response of minerals in the ASTER spectral library. *Journal of Geophysical Research*, 95, 12653-12680. <https://doi.org/dkcp8d>
- Córdoba Ruiz, M. A. (2022). Identificación de nuevas áreas para la exploración en geotermia no convencional en Colombia. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/11509>
- Cruz Guevara, L. E., Mier Umaña, R., & García González, M. (2008). Evolución térmica de la subcuenca de la Baja Guajira. Informe de la fase de campo, contrato N° 56 de 2008 UIS-ANH. Grupo de Investigaciones en Geología de Hidrocarburos y Carbones, Universidad Industrial de Santander.
- Dwyer, J. L., Roy, D. P., Sauer, B., Jenkerson, C. B., Zhang, H., & Lymburner, L. (2018). Datos listos para el análisis: análisis que permite el análisis del archivo Landsat. *Teledetección*, 10(9), art. n.º 1363. <https://doi.org/10.3390/rs10091363>
- Ferreira, K. R., Queiroz, G. R., Camara, G., Souza, R. C. M., Vinhas, L., Marujo, R. F. B., Simoes, R. E. O., Noronha, C. A. F., Costa, R. W., Arcanjo, J. S., Gomes, V. C. F., & Zaglia, M. C. (2020). Using Remote Sensing Images and Cloud Services on AWS to Improve Land Use and Cover Monitoring. *IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)*, Santiago, Chile, 2020, 558-562. <https://doi.org/10.1109/LAGIRS48042.2020.9165649>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*.
- Irish, R. R. (2000). Landsat 7 automatic cloud cover assessment. Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI. <https://doi.org/10.1117/12.410358>
- Li, Y., Liu, C., Zhang, J., Zhang, P., & Xue, Y. (2020). Monitoring Spatial and Temporal Patterns of Rubber Plantation Dynamics Using Time-Series Landsat Images and Google Earth Engine. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 9450-9461. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3110763>
- NASA. (2024). ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. Recuperado de <https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/aster>.
- Rowan, L. C., & Mars, J. C. (2003). Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 350-366. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00127-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00127-X)
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., ... & Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154-172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Huete, A. R., et al. (1997). A modified soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 59(3), 243-250. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5)
- Rouse, J. W., et al. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, 1, 309-317.
- Qi, J., et al. (1994). A modified soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48(1), 119-126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90010-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90010-9)
- Gitelson, A. A., et al. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and reflectance spectra in broadleaf trees and shrubs. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 229-235. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00156-0)
- Matiz-León, J. C., Rodríguez-Rodríguez, G., & Alfaro-Valero, C. (2019). Modelos de temperatura del suelo a partir de sondeos superficiales y sensores remotos para el área geotérmica de Paipa, Boyacá-Colombia. *Boletín de Geología*, 41(2), 71-88. DOI: 10.18273/revbol.v41n2-2019004. Baddi, M. H. et al. (2014). Correlación No-Paramétrica y su Aplicación en la Investigaciones Científica. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 9(2), 31-40.
- Tecuapetla-Gómez, I., Rosales-Marticorena, F., & Galicia-Gómez, B. F. (2024). Phenology curve estimation via a mixed model representation of functional principal components: Characterizing time series of satellite-derived vegetation index. Recuperado de arXiv.
- Vega Salazar, E. (2019). Relación entre temperaturas de banda térmica en imágenes satelitales y estudios geoquímicos. Manizales: Universidad de Manizales.
- García Fernández, M. A. (2015). Análisis de series de datos de teledetección de índices de vegetación (Tesis doctoral). Universidad de Alicante. Recuperado de Repositorio Institucional RUA.
- Kaligari Torres, V., & Páez Cuervo, A. M. (2021). Aplicación de índices espectrales para monitoreo de fenómenos climáticos y vegetativos. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.



