

## INNOVACIONES EN TECNOLOGÍA SATELITAL: MONITOREO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y MANTENIMIENTO PREDICTIVO CON INSAR

Johanna Andrea Rodríguez Pardo – Jady Shirley Upegui Pachón

Carrera 9 No. 73-44

E.mail: [jarodriguez@enlaza.red](mailto:jarodriguez@enlaza.red) – [jupegui@enlaza.red](mailto:jupegui@enlaza.red)

Bogotá, D.C. – Colombia

### Resumen

Con la implementación de la tecnología satelital para el monitoreo de líneas de transmisión, es posible monitorear áreas en las que se presenten fenómenos de remoción en masa regionales y que puedan afectar la estabilidad de la línea. De esta forma, es posible realizar la detección temprana de deformaciones y desplazamientos en las estructuras de líneas de transmisión, lo que permite prevenir o disminuir la probabilidad de ocurrencia de fallos y daños graves.

### Introducción

Considerando la longitud de las líneas de transmisión y la diversidad de entornos geológicos-geotécnicos que atraviesan, es necesario implementar tecnologías avanzadas que permitan comprender y monitorear los fenómenos de remoción en masa que pueden llegar a afectar la estabilidad de los sitios de torre. En ese sentido, para realizar este seguimiento se escogió la tecnología de radar de apertura sintética interferométrica (InSAR por sus siglas en inglés), la cual utiliza datos obtenidos por radar para mapear deformaciones en la superficie terrestre con alta precisión.

Con base en lo anterior, en este artículo se presentan algunos principios fundamentales de la tecnología InSAR, así como la aplicación de esta herramienta en zonas de influencia de las líneas de transmisión de Enlaza Grupo Energía Bogotá que presentan movimientos de remoción en masa de carácter regional y que por la complejidad de las zonas requieren un monitoreo a mayor escala, de

forma que se tenga información suficiente para la toma de decisiones.

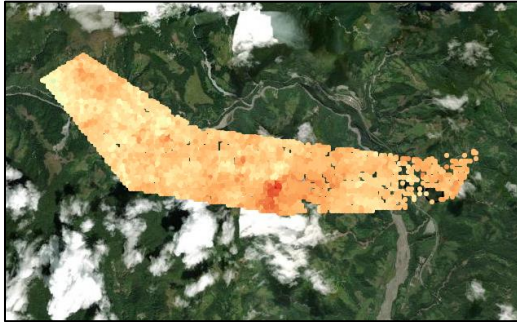
### Generalidades de la Tecnología InSAR

La aplicación de la tecnología InSAR dentro de este artículo está orientada como una herramienta para el seguimiento de procesos geotécnicos de áreas extensas con gran precisión y que permite obtener información suficiente e histórica para implementar acciones preventivas sobre los activos en riesgo.

La tecnología InSAR se basa en la sobreposición de múltiples imágenes de radar de apertura sintética (SAR – *Synthetic Aperture Radar*) que son tomadas con alta resolución sobre la misma área en diferentes momentos del día y de la noche por medio de ondas microondas, lo que permite determinar las variaciones en las mediciones en función de la posición del satélite y el tiempo de adquisición de información, permitiendo generar un modelo digital del terreno y definición de zonas con deformación concentrada en el terreno con alta precisión.

A estas imágenes de satélite se les conoce como interferogramas, que se generan a partir de la comparación de los valores de fase de dos imágenes tomadas en diferentes pasadas del satélite. Con el análisis de los interferogramas es posible generar mapas de deformación del terreno (ver Fig. 1), en la que se presenta el resultado de la interpretación de imágenes en una zona de estudio de los activos de la empresa, donde ocurren fenómenos de remoción en masa que son activados, principalmente, en épocas de lluvias pero que deben ser monitoreados periódicamente

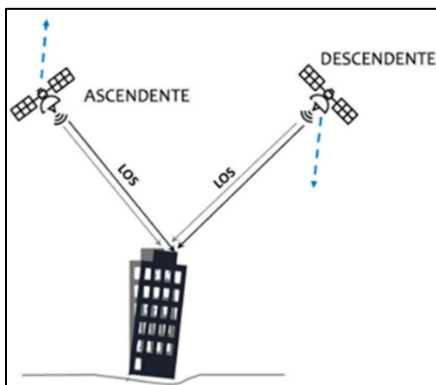
considerando la magnitud de los procesos geotécnicos identificados y la relevancia de las línea de transmisión que pasan por la zona.



**Fig. 1.** Mapa de deformaciones acumuladas en zona de monitoreo de activos de la empresa  
Fuente: Informes Técnicos – Geoandina-i SAS en colaboración con Detektia, 2025

La generación de mapas de deformaciones permite la detección temprana y de forma completamente remota de cualquier deformación ocurrida en las líneas de transmisión en análisis y, de esa forma, mejorar y priorizar el mantenimiento preventivo y predictivo de los activos y, consecuentemente, reducir costos y/o la ocurrencia de accidentes.

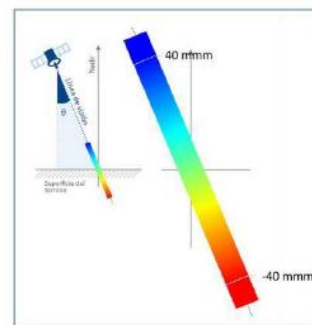
InSAR mide las deformaciones en dos sentidos: (a) Ascendente (cuando el satélite viaja de sur a norte) y (b) Descendente (cuando el satélite viaja de norte a sur). En la Fig. 2 se observa cómo se ven dos puntos de vista (ascendente y descendente). La composición de estas imágenes es la que permite la precisión milimétrica característica de esta metodología.



**Fig. 2.** Dirección de las lecturas  
Fuente: Detektia

Sin embargo, hay zonas en las que únicamente se tiene uno de los dos puntos de vista (imagen ascendente o descendente), esta falta de información no permite que se tenga precisión milimétrica de los movimientos, sin embargo, es posible definir las regiones con tendencia a acumular deformaciones en las zonas de análisis.

Las mediciones realizadas con la tecnología InSAR son unidimensionales, es decir, miden los movimientos en la línea que conecta el satélite con cada punto observado (LOS, Line Of Sight por su sigla en inglés o Línea de Visión en español). Para obtener los desplazamientos en el eje vertical y planimetría, es necesario descomponer los movimientos de las LOS (ver Fig. 3) teniendo en cuenta la geometría del sistema y esto resulta en un mapa de deformaciones que se presenta por medio de puntos medidos en escala de color, en donde los colores fríos representan deformaciones que se acercan al sensor (acumulaciones de material) y los colores cálidos representan deformaciones que se alejan del sensor (pérdida de material, hundimientos o deslizamientos).



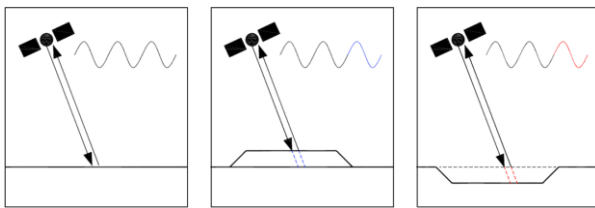
**Fig. 3.** Dirección del movimiento detectado a lo largo de la línea de visión de satélite (LOS) positivo por acercamiento (azul) o negativo por alejamiento (rojo)  
Fuente: Adaptado de SkyGeo

En la Fig. 4 se representan las diversas mediciones que se pueden obtener a lo largo del tiempo. La primera imagen corresponde a la medición de distancia de referencia entre el sensor y el terreno y a partir de las cuales se compararán las mediciones posteriores de forma que se pueda

establecer la magnitud de las deformaciones que puedan ocurrir.

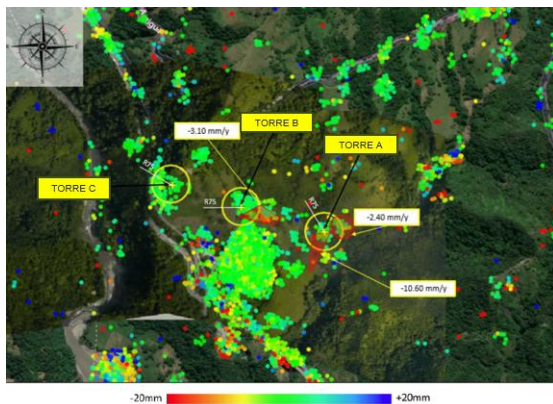
En la segunda imagen, se representa la construcción de un relleno en el punto de análisis, en ese sentido, el sensor detecta cambios en la distancia entre el sensor y el terreno y una vez que se trata de un *acercamiento* se representan como oscilaciones de onda de color azul.

Por otro lado, en la tercera imagen se representa una excavación en el sitio de análisis y ya que el sensor detecta cambios en la distancia entre el sensor y el terreno y una vez que se trata de *alejamiento* se representan como oscilaciones de onda de color rojo.



**Fig. 4.** Detección de cambios en la distancia entre el sensor y el terreno  
Fuente: Adaptado de SkyGeo

En la Fig. 6, se presenta un mapa de deformación, en el que se identifican puntos de color de acuerdo con la escala de calor definida, en un área importante de análisis y en el que se pueden identificar zonas de concentración de puntos que indican zonas de desplazamientos y que serán analizados con detalle en el estudio de caso.



**Fig. 5.** Ejemplo de mapas de deformaciones  
Fuente: Informes técnicos, 2021

### Ventajas de la Tecnología InSAR en el Mantenimiento de Líneas de Transmisión

Dentro de las principales ventajas que se tienen por la implementación de tecnología InSAR para el monitoreo de Líneas de Transmisión se identifican:

- No se requiere la instalación de equipos en la zona de análisis.
- No se requiere de permisos para realizar vuelos.
- Es posible realizar el monitoreo periódico de áreas importantes, con lo cual es factible el control y monitoreo de fenómenos de remoción en masa de carácter regional.
- Es posible controlar la evolución temporal de deformaciones en las zonas evaluadas, inclusive en zonas de difícil acceso.
- Considerando la precisión de las mediciones, es posible calibrar modelos matemáticos y mejorar las predicciones.
- Aporta herramientas técnicas en la toma de decisiones para realizar el mantenimiento preventivo.
- Es posible realizar la optimización de inspecciones para áreas importantes y en la que se presentan fenómenos de remoción en masa de carácter regional. Con el monitoreo con dron se realiza la inspección de una franja más estrecha, aunque con una escala de detalle mayor.
- Comparada con el monitoreo visual, es posible tener información de forma macro sin tener las limitaciones que se presentan con el recorrido de las líneas de transmisión tales como la dificultad de accesos, largos períodos de inspección para el mismo tramo y desgaste físico del personal.

### Limitaciones de la Tecnología InSAR en el Mantenimiento de Líneas de Transmisión

Dentro de las principales limitaciones que se tienen por la implementación de tecnología InSAR para el monitoreo de Líneas de Transmisión se identifican:

- La interacción de las señales transmitidas depende de la estructura y de las propiedades dieléctricas del objetivo del SAR. Cuando las ondas de radar del satélite encuentran un objeto, son parcialmente absorbidas, dispersadas y reflejadas.
- Muchos factores influyen en la cantidad de dispersión de la información recibida por el sensor, por ejemplo:
  - Rugosidad de la superficie, en zonas muy rugosas dan un retorno difuso hacia el sensor y dificultan la interpretación de la información.
  - En la vegetación ocurre retrodispersión volumétrica cuando las señales rebotan dentro de la vegetación.
  - Doble rebote, cuando los edificios de una ciudad están alineados de tal manera que los pulsos de radar pueden rebotar en las calles y nuevamente en los edificios.
- En zonas donde sólo hay información de lectura en un sólo sentido, no se puede asegurar que la medición sea precisa, sin embargo, los mapas de deformación resultan en información valiosa para definir las zonas de atención.

Cabe resaltar que al aplicar el monitoreo con tecnología InSAR en líneas de transmisión, se mitigan parte de estas limitaciones, considerando que las torres son estructuras reflectivas para las ondas y que la vegetación se mantiene controlada principalmente en los sitios de torre.

### Caso de Estudio

Teniendo en cuenta la características y ventajas del monitoreo InSAR, desde la Gerencia de Mantenimiento de Enlaza Grupo Energía Bogotá se definieron zonas de estudio críticas en las cuales se hizo necesario implementar esta metodología de monitoreo, inicialmente, como un piloto entre 2019 y 2021, y que al verificar la importancia de la información recopilada se retomó en 2024 con procesamiento de datos periódicos. En este

artículo se incluyen los hallazgos más relevantes de una de las zonas en estudio.

Para la zona de estudio, se definió un polígono de 16 km<sup>2</sup> y en el cual se incluye el análisis de 15 sitios de torre de transmisión de alta tensión y los fenómenos de remoción en masa regionales que podrían afectar la infraestructura.



**Fig. 6.** Polígono de estudio  
Fuente: Propia

Para este estudio, se usaron las imágenes captadas por el satélite Sentinel-a1, que tiene una resolución de 20x4 m, es decir que cada píxel representa un rectángulo con estas dimensiones y demora en dar vuelta a la órbita terrestre aproximadamente 12 días, es decir que se tienen imágenes con esa periodicidad. Cabe resaltar que considerando el procesamiento de datos propio de esta tecnología esta resolución es suficiente para tener la información precisa de la zona de estudio.

En la zona de estudio, este satélite obtiene imágenes en una sola dirección y por lo tanto la magnitud de las deformaciones indicadas no es tan precisa, pero sí indica las zonas de deformación presentadas en el área de interés.

Para definir el punto de referencia del análisis desarrollado en el polígono de estudio, se realizó un análisis multitemporal en el que se analizaron 3 años de imágenes estableciendo así la situación inicial del terreno dentro del polígono. Posteriormente se realizan análisis con una periodicidad de 36 días toda vez que el satélite captura imágenes cada 12 días.

Con base en los mapas de deformación resultante del procesamiento de los datos, desde la Gerencia

de Mantenimiento de Enlaza-GEB, se procedió a realizar recorridos en campo para validar la información y comparar los datos del análisis y los recolectados directamente en sitio. Esta comparación permitió validar la aplicabilidad de la metodología en el monitoreo de líneas de transmisión.

A continuación, se presentan hallazgos relevantes encontrados en el desarrollo del monitoreo con tecnología InSAR y que corresponde a la zona entre las torres *A a C* y *G a I*:

**Torre A a C:** En el mapa de deformación de las torres *A* a *C* se identificaron cuatro zonas relevantes (ver Fig. 7) que se describen a continuación:

- Zona 1: Deformaciones asociadas al drenaje natural existente y que corresponde a una divisoria de aguas, en el sitio se identificó que se presentan diversos deslizamientos de material superficial y que pueden llegar a colmar el drenaje y provocar una avalancha que pondría en riesgo la estabilidad de la torre *A* y de la infraestructura cercana.

Por otro lado, se identificó una zona en donde se marcaron puntos de color más frío y que no era coherente con el resto de los puntos de deformación, motivo por el cual se realizó una inspección en campo y se identificó que se estaba presentando una deformación superficial y que se reflejaba en la vegetación de la zona (Ver Fig. 8). Esta reptación coincide con las coordenadas de la concentración de puntos azules del mapa de deformación.

- Zona 2: Se identificó una concentración de puntos en una zona del drenaje que tiene dirección a la torre *A*; en la verificación de campo se identificó un desprendimiento de material y flujo de lodo ocasional, aparentemente estabilizado de forma natural.

- Zona 3: La concentración de puntos corresponde a una erosión lateral del drenaje

principal y en el que se identifica daño en la estructura de drenaje existente. Esta erosión lateral tuvo una progresión importante y fue identificada y reportada por el monitoreo InSAR y corroborada en sitio. Se presume que esta socavación puede afectar el sitio de torre *A*.

- Zona 4: se identificaron deformaciones ladera arriba, sin embargo, la misma parece estar estabilizada naturalmente. A pesar de la concentración de puntos, en campo se identificaron cambios únicamente en la vegetación, movimientos superficiales lentos (reptación) y cambios en la superficie del terreno por sobrepastoreo concentrado en esta zona.

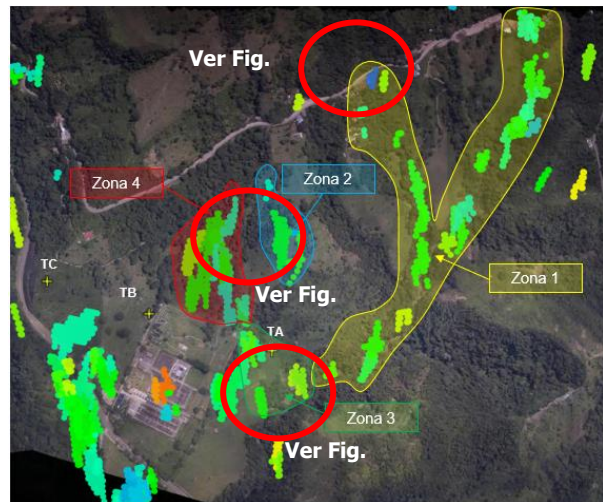


Fig. 7. Mapa de deformación Torres A a C  
Fuente: Propia, 2021



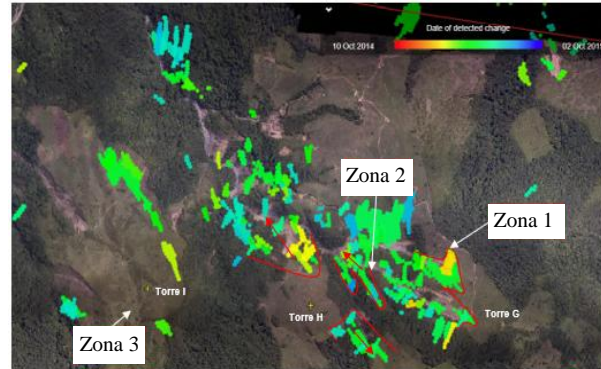
Fig. 8. Reptación presentada en la parte alta de la ladera – Zona 1  
Fuente: Propia, 2021



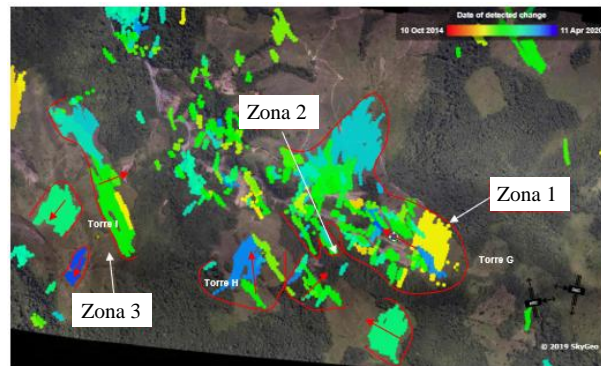
**Fig. 9.** Reptación presentada en la parte alta de la ladera – Zona 2  
Fuente: Propia, 2021



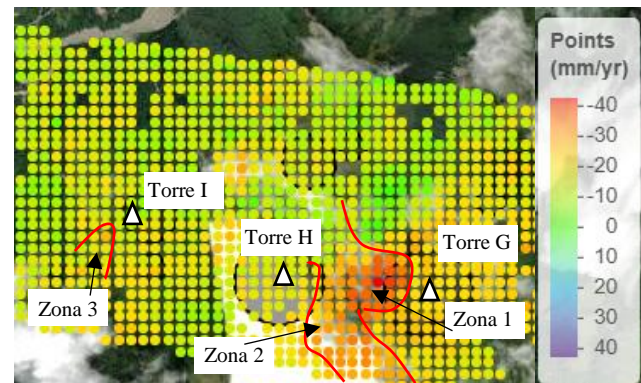
**Fig. 10.** Socavación – Zona 3  
Fuente: Propia, 2021



**Fig. 11.** Mapa de deformaciones Torre G a I  
Fuente: Propia, octubre, 2019



**Fig. 12.** Mapa de deformaciones – Torre G a I  
Fuente: Propia, abril, 2021



**Fig. 13.** Mapa de deformaciones – Torre G a I  
Fuente: Propia, enero, 2025

**Torre G a I:** En el polígono de estudio la zona más crítica se identificó entre las torres G e I, en las Fig. 11 a Fig. 13 se presenta la comparación entre la referencia (octubre, 2019), la evolución del proceso (abril, 2020) y las condiciones actuales (enero, 2025); esta última se hace mediante una nueva plataforma por lo que se evidencia un cambio en la presentación de los resultados. En esta zona se identificaron tres regiones importantes de deformación, cada una asociada a cada una de las torres en estudio.

- **Zona 1:** Se observa un incremento en la corona del deslizamiento en dirección a la torre G; en campo se identificó una gran deformación en el material superficial lo que ha causado escalonamientos en la superficie y que corresponde a las zonas de tonalidad azul más intenso y amarillas (Fig. 14). En enero de 2025

se continúa identificando una acumulación de deformación en esta zona y en campo se observa que el proceso continúa avanzando en dirección a la Torre G.

- **Zona 2:** Se identifica una amplitud en los movimientos de remoción en masa asociados a los drenajes naturales cercanos a la torre H, adicionalmente, se identifican movimientos en el terreno que corresponden a escalonamientos y agrietamientos importantes y que son visibles en la inspección del sitio (Fig. 15). En enero de 2025, continúa una concentración de puntos de deformación en el drenaje lateral y se observa pérdida de material en el flanco derecho del cauce, este es el más cercano a la torre H.
- **Zona 3:** Se identifica la reactivación de procesos antiguos cercanos a la torre I y que corresponden a la pérdida de cobertura vegetal y al favorecimiento de erosiones progresivas. La deformación superficial del terreno y que también corresponde a escalonamientos del terreno que está asociado al cambio de pendiente por la divisoria de aguas (Fig. 16). En enero de 2025 se identifica una mayor concentración de puntos de deformación con menor escala al costado izquierdo de la torre H y que corresponde con los movimientos previamente identificados.



**Fig. 14.** Deformaciones – Torre G  
Fuente: Propia, 2022



**Fig. 15.** Deformaciones – Torre H  
Fuente: Propia, 2022



**Fig. 16.** Deformaciones – Torre I  
Fuente: Propia, 2022

### Conclusiones

Se resalta la capacidad de realizar monitoreo remoto y no intrusivo, disminuyendo la necesidad de inspecciones físicas frecuentes, lo que reduce costos y riesgos.

Adicionalmente, al proporcionar información precisa sobre las condiciones de las líneas de transmisión, permite asignar recursos de mantenimiento de manera más eficiente y priorizar las áreas críticas.

La detección temprana de deformaciones y desplazamientos en las estructuras de líneas de transmisión, lo que ayuda a prevenir fallos y daños graves.

Esta detección temprana de problemas y el mantenimiento oportuno contribuyen a garantizar



8º CONGRESO MUNDIAL  
DE MANTENIMIENTO Y  
GESTIÓN DE ACTIVOS



21 · 22 · 23  
MAYO · 2025  
Centro de Convenciones  
Cartagena de Indias - Colombia



22º Congreso Iberoamericano de Mantenimiento  
27º Congreso Internacional de Mantenimiento y Gestión de Activos - CIMGA

la seguridad y confiabilidad en la transmisión de energía.

Al identificar y abordar problemas antes de que causen interrupciones en la transmisión de energía, InSAR permite evitar sanciones por energía no suministrada.

La información histórica recopilada facilita la planificación a largo plazo del mantenimiento de las líneas de transmisión.

### **Bibliografía y Recursos Tecnológicos**

[1] SHAOWEI, L.; WENBIN, X.; ZHIWEI, L. Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications and challenges. Geodesy and Geodynamics. Volume 13, Issue 2. 2022. Pages 114 – 126.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674984721000860?via%3Dihub>

[2] KALAVREZOU, I.E.; CASTRO-MELGAR, I.; NIKA, D.; GATSIOS, T.; LALECHOS, S.; PARCHARIDIS; I. Application of Time Series INSAR (SBAS) Method Using Sentinel-1 for Monitoring Ground Deformation of the Aegina Island (Western Edge of Hellenic Volcanic Arc). Land 2024, 13 (4), 485.

<https://www.mdpi.com/2073-445X/13/4/485>

[3] Informes técnicos, elaborados por el Contratista Geoandina-I sobre los activos y que son de propiedad de la Empresa.

[4] NASA Earth Observatory  
<https://earthobservatory.nasa.gov>

[5] European Space Agency (ESA) – Sentinel-1 SAR data

<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1>

Johanna Andrea Rodríguez Pardo: Ingeniera Civil y MSc en Geotecnia de la Universidade Federal de Ouro Preto (Minas Gerais, Brasil). Tesis de maestría sobre Análisis y gestión de riesgos. 19 años de experiencia tanto en Brasil como en Colombia en el diseño y modelamiento de obras geotécnicas, diagnóstico de procesos de remoción en masa en obras de ingeniería, Monitoreo de procesos de remoción en masa. Actualmente, asesor de la Gerencia de Mantenimiento de Enlaza Grupo Energía Bogotá para el mantenimiento preventivo y predictivo de las líneas de transmisión eléctrica en operación.

Cel: 313 592 8259

e-mail: [jarodriguez@enlaza.red](mailto:jarodriguez@enlaza.red)

Jady Upegui Pachon: Ingeniera civil egresada de la universidad de la Universidad de La Salle, con 19 años de experiencia en la construcción y mantenimiento de infraestructura vial y 5 años de experiencia como asesor de la Gerencia de Mantenimiento de Enlaza Grupo Energía Bogotá en la planeación, programación y actividades especializadas en el mantenimiento predictivo de líneas de transmisión.

Cel: 300 268 8941

e-mail: [jupegui@enlaza.red](mailto:jupegui@enlaza.red)