



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ALERTAS
TEMPRANAS DE DESLIZAMIENTOS BASADO
EN UN MODELO DE ANALÍTICA PREDICTIVA E
INTELIGENCIA ARTIFICIAL, APLICADO A LAS
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN OPERADAS POR
INTERCOLOMBIA S.A E.S.P.**

Autor
Cristian Camilo Ramírez Sánchez

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2020



Construcción de un sistema de alertas tempranas de deslizamientos basado en un modelo de analítica predictiva e inteligencia artificial, aplicado a las líneas de transmisión operadas por INTERCOLOMBIA S.A E.S.P.

Cristian Camilo Ramírez Sánchez

Informe de práctica
como requisito para optar al título de:
Ingeniero Civil

Asesores

Yenni Mariana Ramírez Mazo, Ingeniera Civil
Alexander Bedoya Bustamante, Ingeniero Civil

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2020.

CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ALERTAS TEMPRANAS DE DESLIZAMIENTOS BASADO EN UN MODELO DE ANALÍTICA PREDICTIVA E INTELIGENCIA ARTIFICIAL, APLICADO A LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN OPERADAS POR INTERCOLOMBIA S.A E.S.P.

Resumen

Desde su creación hace seis años, INTERCOLOMBIA S.A E.S.P se ha encargado de la administración, dirección y operación de más de 1.700 líneas de transmisión de energía distribuidas por todo el territorio colombiano, velando por su correcto funcionamiento y mantenimiento. De aquí surge la necesidad de estudiar, evaluar y controlar las variables que intervienen en la vida útil de estos activos.

Dentro de esas variables, el componente “Sitio de Torre” representa altos costos en los proyectos de líneas de transmisión y subestaciones eléctricas, toda vez que, de este dependen las obras civiles a construir, ya sea para prevenir, mitigar o eludir riesgos relacionados con la estabilidad del terreno, por lo que deben evaluarse los parámetros que influyen en la ocurrencia de eventos relacionados con movimientos en masa. Uno de los principales parámetros a evaluar, corresponde a la caracterización geomecánica de los sitios de torre, cuya información puede obtenerse de los estudios de suelos y de los diseños de cimentaciones almacenados en las bases de datos de la compañía.

Durante la ejecución del proyecto se realizó en primer lugar, una base de datos dinámica y de fácil acceso con toda la información compilada sobre estudios de suelos y diseño de cimentaciones de las líneas de transmisión. Esta información permitió generar un mapa de suelos característico de los sitios de torre para luego ser integrado a otros mapas con información de tipo geomorfológico, topográfico e hidrológico.

Así pues, el propósito fundamental del proyecto consistió no sólo en impulsar la digitalización de la información relacionada con la gestión integral de los activos sino también avanzar en la automatización de los procesos mediante la integración de analítica predictiva e inteligencia artificial dentro de los lineamientos estipulados por la estrategia corporativa ISA 2030. Esto último se logró precisamente mediante la estructuración de un sistema de alertas tempranas de deslizamientos aplicado a las líneas de transmisión operadas por INTERCOLOMBIA S.A E.S.P, el cual adquirió como insumo la información previamente recolectada sobre caracterización geomecánica de los suelos, topografía, geomorfología e historial de precipitaciones, y toma decisiones eficientes de acuerdo a la experticia ingenieril configurada en un algoritmo, para facilitar un mayor control y seguimiento a los activos en las labores de mantenimiento y operación, disminuyendo así los riesgos asociados a sobrecostos en obras civiles proyectadas para prevenir, mitigar o corregir problemas de movimientos de masa.

Introducción

Interconexión Eléctrica S.A (ISA) nace el 14 de septiembre de 1967, ante la inminente necesidad de impulsar la integración de los sistemas eléctricos del país, con el fin de abastecer la futura demanda nacional. La naturaleza jurídica de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. -ISA- corresponde a una empresa de servicios públicos mixta, constituida como sociedad anónima por acciones, de carácter comercial, del orden nacional y vinculada al Ministerio de Minas y Energía.

Hoy en día, ISA es un grupo empresarial multilatinamericano reconocido por la excelencia de sus operaciones en los negocios de energía, vías y telecomunicaciones; los cuales se desarrollan orientados por la ética y bajo prácticas de gobierno corporativo que son ejemplo en la región. Así ISA y sus empresas, contribuyen a mejorar la calidad de vida de más de 170 millones de personas en Colombia, Brasil, Chile, Perú, Bolivia, Argentina y Centro América, a través de la operación de 43 filiales y subsidiarias.

INTERCOLOMBIA S.A E.S.P como filial del grupo ISA, es responsable de la transmisión de energía eléctrica en gran parte del país y a través de su propósito superior, "Conexiones que inspiran", tiene como función principal operar y mantener los activos en Colombia, por lo que es esencial conocer el comportamiento de las variables que afectan su desempeño. Desde el punto de vista de riesgos, el suelo es uno de los componentes que mayor impacto económico tiene sobre los proyectos de líneas de transmisión y subestaciones eléctricas, toda vez que, de este depende el tipo y dimensiones de obras civiles a utilizar, ya sea para prevención, mitigación o solución de problemas relacionados con la estabilidad del terreno y la estructura. Dada la variabilidad de la geología colombiana y, por ende, de los suelos que conforman el territorio nacional, se hace necesario caracterizar los corredores en donde tienen presencia los activos administrados por INTERCOLOMBIA S.A E.S.P, con la finalidad de determinar su impacto en los proyectos existentes y futuros.

Actualmente, se cuenta con gran cantidad de información geotécnica sin normalizar o digitalizar en las bases de datos de INTERCOLOMBIA S.A E.S.P, por lo que allí se evidencia una oportunidad de mejora en el tratamiento de la información, así como la posibilidad de automatizar procesos y dinamizar la toma de decisiones con un mayor grado de seguridad, componentes de gran importancia en la gestión de activos, para los procesos de creación, mantenimiento y renovación. Cabe resaltar que este proyecto no pretende remplazar la realización de estudios de suelos para nuevos proyectos u obras civiles de mantenimiento, sino constituir una base de referencia, y a partir de dichos datos y de información relacionada con otros parámetros geotécnicos e hidrológicos, estructurar un sistema de alertas tempranas de deslizamientos basado en un modelo de inteligencia artificial, para agilizar la toma de decisiones en todo el ciclo de vida del activo, con especial énfasis en el proceso de mantenimiento.

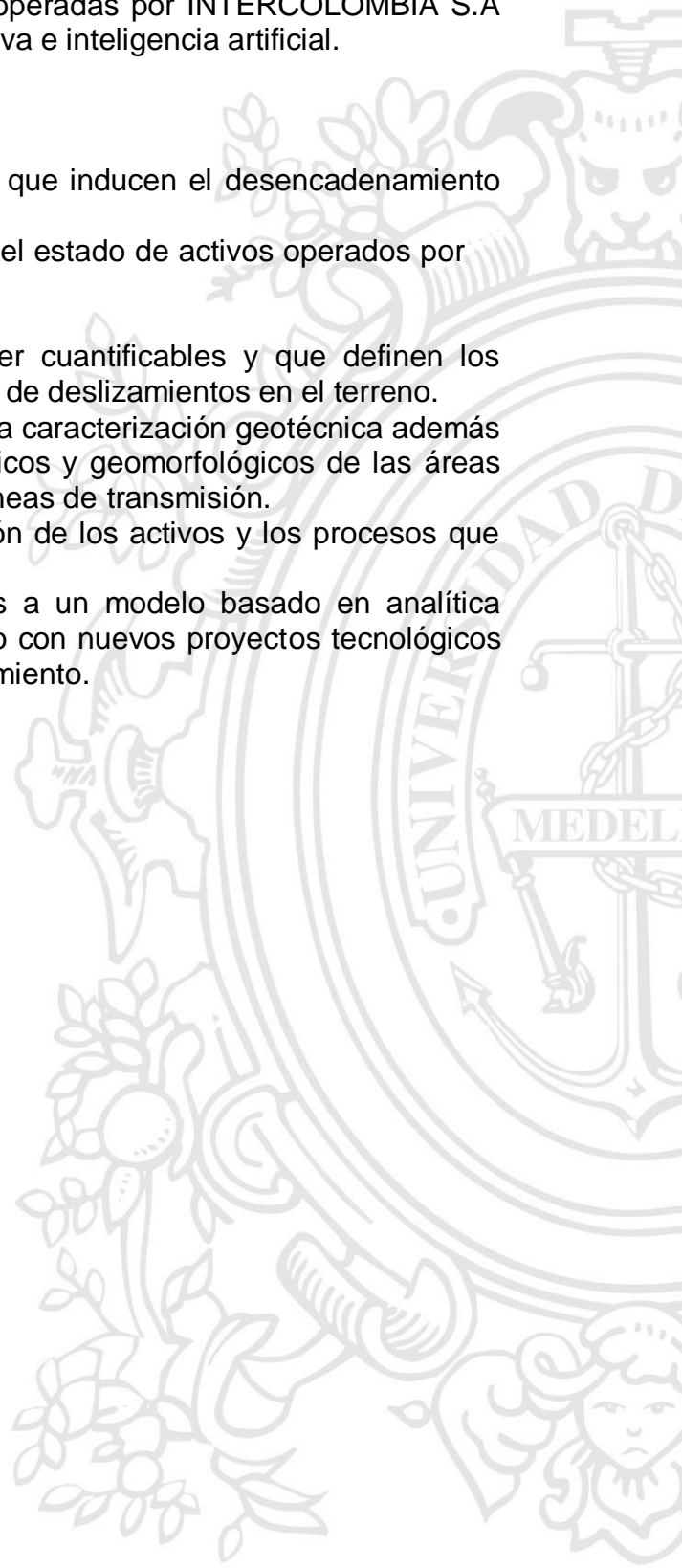
Esta iniciativa se alinea con la estrategia corporativa ISA 2030, ya que con ella se busca avanzar en el mantenimiento avanzado de acuerdo con el subíndice "Fortalecer la determinación de la condición de los equipos con base en analítica predictiva e inteligencia artificial", puesto que se están automatizando los procesos relacionados con la toma de decisiones en la Dirección de Mantenimiento, y se busca una gestión integral y eficiente de los activos operados por INTERCOLOMBIA S.A E.S.P.

Objetivo General

Estructurar un sistema de alertas tempranas de deslizamientos potenciales en terrenos aferentes a las líneas de transmisión operadas por INTERCOLOMBIA S.A E.S.P, a partir de un modelo de analítica predictiva e inteligencia artificial.

Objetivos Específicos

- Identificar los parámetros fundamentales que inducen el desencadenamiento de los movimientos en masa.
- Determinar la condición de los equipos y el estado de activos operados por INTERCOLOMBIA S.A E.S.P.
- Reconocer las variables que pueden ser cuantificables y que definen los parámetros involucrados en la ocurrencia de deslizamientos en el terreno.
- Compilar la información relacionada con la caracterización geotécnica además de los parámetros hidrológicos, topográficos y geomorfológicos de las áreas de análisis de cada sitio de torre de las líneas de transmisión.
- Impulsar la digitalización de la información de los activos y los procesos que intervienen en su funcionamiento.
- Ajustar el sistema de alertas tempranas a un modelo basado en analítica predictiva e inteligencia artificial, alineado con nuevos proyectos tecnológicos desarrollados en la Dirección de Mantenimiento.



Marco Teórico

INTERCOLOMBIA S.A E.S.P es la encargada de administrar y operar los activos de ISA en el territorio colombiano, entendiéndose activo como todo el equipo que permite la transmisión de energía, es decir, las torres que forman las líneas de transmisión y se interconectan a las subestaciones. Para la administración, construcción, operación y mantenimiento de la red de transmisión de energía, INTERCOLOMBIA S.A E.S.P cuenta con cuatro CTE (Centros de Transmisión de Energía): Centro, Oriente, Noroccidente, Suroccidente. Cada uno de ellos es responsable de un grupo específico de líneas de transmisión y sus respectivas subestaciones de acuerdo a como se encuentran organizados los unifilares, que son la representación gráfica de los circuitos eléctricos mediante una única línea para hacer más fácil su comprensión (Interconexión Eléctrica S.A E.S.P, 2019). A continuación, se presenta la distribución y componentes del diagrama unifilar para el CTE Suroccidente.

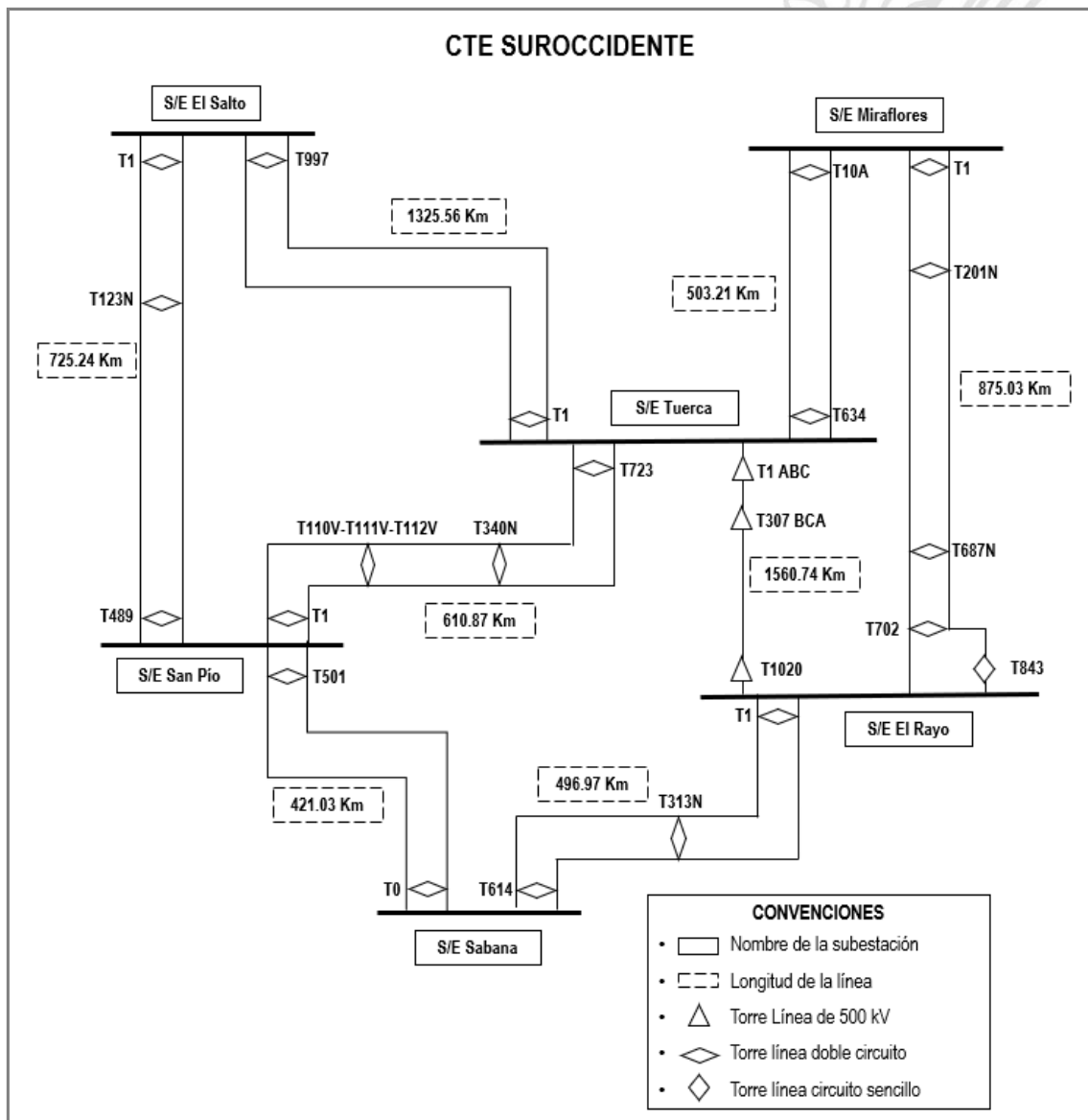


Figura 1. Diagrama Unifilar CTE Suroccidente. Fuente: (Elaboración propia)*

**Nota: Por reserva de información de la compañía, no se presenta el diagrama unifilar real del CTE Suroccidente, sino, una elaboración ficticia del diagrama con elementos similares.*

Ahora bien, las torres de transmisión de energía, al igual que los edificios convencionales, son estructuras diseñadas para soportar, además de su propio peso, cargas de servicio y fuerzas derivadas de las condiciones del ambiente con cierto grado de seguridad. Este criterio sirve para clasificar las torres en función de las cargas actuantes; los elementos que componen una estructura de apoyo deben ser dimensionados a fin de resistir, con seguridad, las solicitaciones a las que son sometidos (Labegalini *et al.*, 1992).

Respecto de los esfuerzos, Escudero (2008) afirma que las estructuras resisten en general tres tipos de esfuerzos en condiciones normales:

- Cargas verticales debidas al peso propio, conductores, aisladores.
- Cargas transversales debidas al viento sobre las estructuras y conductores.
- Cargas longitudinales debidas al tiro de los conductores.

En condiciones excepcionales, como la rotura de un conductor, y también durante el montaje de la torre debe soportar esfuerzos de torsión. De lo dicho se deduce que una torre se asemeja a una viga empotrada en el suelo, que debe calcularse para soportar pandeo y esfuerzos de flexotorsión. Por la manera de resistir estos esfuerzos se las clasifica en estructuras autoportantes y arriendadas. Las primeras son verdaderas vigas empotradas en el suelo y transmiten los esfuerzos a las fundaciones. Las segundas son estructuras flexibles que transmiten a la fundación casi exclusivamente esfuerzos verticales y los esfuerzos transversales y longitudinales son absorbidos por las riendas o tirantes (Escudero, 2008).

Toda obra de ingeniería, asentada en la superficie terrestre, necesita de una estructura de transición entre los esfuerzos generados por condiciones de trabajo y peso propio, y el terreno subyacente. Esta estructura de transición no es más que una obra de fundación, que puede ser tan simple como la excavación de una zanja para colocar una parrilla o tan compleja como las fundaciones de grandes obras civiles, entre las que se encuentran las zapatas, pilotes, micropilotes, caissons o una combinación de ellos. Normalmente, el proyecto de fundación de una obra de ingeniería es la última fase del proyecto estructural de la misma, ya que su diseño depende de las cargas solicitantes de la superestructura. Para determinar su dimensionamiento, se deben tener en cuenta en su estudio, el cálculo de todas las cargas posibles que serán soportadas por la estructura y transmitidas a la fundación, así como el estudio de las características geotécnicas del terreno (Labegalini *et al.*, 1992).

De igual importancia a la consideración de las cargas actuantes, se encuentra la identificación del tipo de terreno sobre el que se construyen las fundaciones. Así pues, dependiendo de su composición mineralógica y su proceso de formación, los suelos poseen un comportamiento mecánico y propiedades características específicas. En este sentido, una investigación de las cualidades de la superficie y del subsuelo, en el lugar de asentamiento de una carga (obra de ingeniería), es necesaria para la determinación de las cualidades geotécnicas del terreno que soporta las fundaciones, para un perfecto y adecuado dimensionamiento de estas (Labegalini *et al.*, 1992).

Adicionalmente, dependiendo de la finalidad del levantamiento, de la precisión, de las cualidades y características del terreno, existen varios métodos de investigación del suelo disponibles:

- **Métodos indirectos o geofísicos:** Son métodos variados, basados en medidas físicas, y escogidos en función de la finalidad del levantamiento,

como son la exploración de petróleo, prospección de minerales, prospección de agua subterránea o investigación para grandes proyectos de ingeniería civil.

- **Métodos directos o mecánicos:** Efectuados a través de perforaciones y sondeos en el terreno, normalmente se recuperan muestras, que deben ser analizadas en el laboratorio de

mecánica de suelos para la determinación de sus características. Son usados para fines de extracción de materia prima (agua, petróleo, gas, etc.) ventilación de minas, abatimiento del nivel freático, mapeado geológico del subsuelo, para la determinación de las cualidades geotécnicas del mismo. En cuanto a las formas de excavación para la obtención de muestras pueden ser manuales (pozos, trincheras, apiques, agujeros cilíndricos), o mecánicos (sondeos a percusión, sondeos a rotación, sondeos por lavado, SPT - Standard Penetration Test-).

Según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente (2010), el estudio geotécnico es aquel que comprende el reconocimiento de campo, la investigación del subsuelo, los análisis y recomendaciones de ingeniería necesarios para el diseño y construcción de las obras en contacto con el suelo, de tal forma que se garantice un comportamiento adecuado de la edificación, protegiendo ante todo la integridad de las personas ante cualquier fenómeno externo, además de proteger vías, instalaciones de servicios públicos, predios y construcciones vecinas.

Hoy en día, los estudios de suelos pueden ser integrados a nuevas aplicaciones tecnológicas y pueden ser enriquecidos con información de tipo hidrológico con el fin de refinar las características geotécnicas y bioclimáticas del terreno y así obtener modelos más aproximados a la realidad que permitan tomar decisiones acertadas sobre problemas relacionados con los movimientos en masa. Las nuevas tecnologías adoptadas en topografía, como es el caso de LiDAR, permiten monitorizar un terreno con detalle y obtener diferentes mapas a través de un sistema láser, como se expone en la Figura 2 (Martínez, 2017).

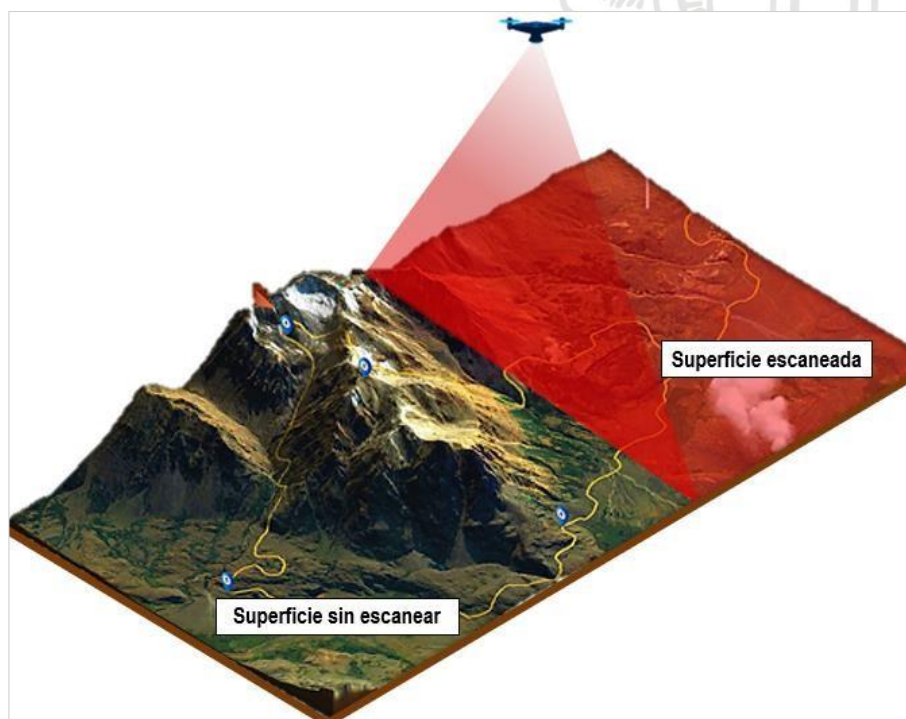


Figura 2. Esquema de la captura de datos LiDAR desde un dron. Fuente: (Elaboración propia).

LiDAR es el acrónimo de Light Detection and Ranging, es decir, detección por luz y distancia, el cual trata de un sistema láser que permite medir la distancia entre el punto de emisión de ese láser hasta un objeto o superficie. El tiempo que tarda ese láser en llegar a su objetivo y volver del mismo, informa la distancia entre los dos puntos. El resultado se puede compilar en un mapa en 3D de alta resolución del terreno en cuestión. De aquí que las aplicaciones de LiDAR se den, sobre todo, en el

mundo de la geodesia, específicamente en el estudio de la geología que establece la forma y magnitud de una superficie, y mediante la cual se pueden diseñar diferentes mapas según las solicitudes que se

tengan (Martínez, 2017). Seguidamente se muestra una imagen con la nube de puntos de datos obtenidos mediante LiDAR:

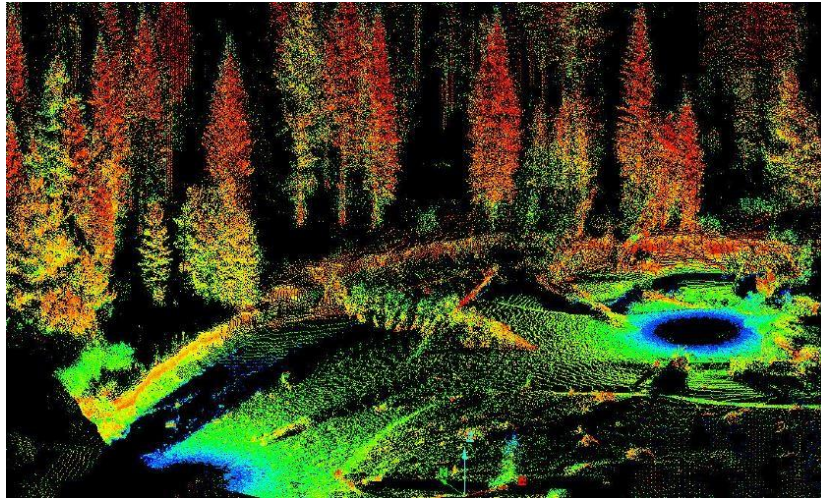


Figura 3. Muestra de datos LiDAR terrestres. Fuente: (Albacete, 2011).

Según la literatura, un deslizamiento se define como un tipo de desplazamiento o movimiento de una masa de tierra provocado por un desequilibrio entre las fuerzas actuantes y resistentes de un talud. Esta inestabilidad depende, principalmente, de las características geotécnicas y geológicas del terreno, sin embargo, numerosos estudios han demostrado que variables hidrológicas como la precipitación y la evapotranspiración determinada por la cobertura, son de igual importancia en el desencadenamiento de movimientos de masa y, por ende, cualquier estudio de estabilidad de taludes debe incluir todos estos parámetros en conjunto para determinar la condición más crítica de falla potencial (Salvá, 2019). La nomenclatura de un deslizamiento típico se presenta en la figura que sigue:

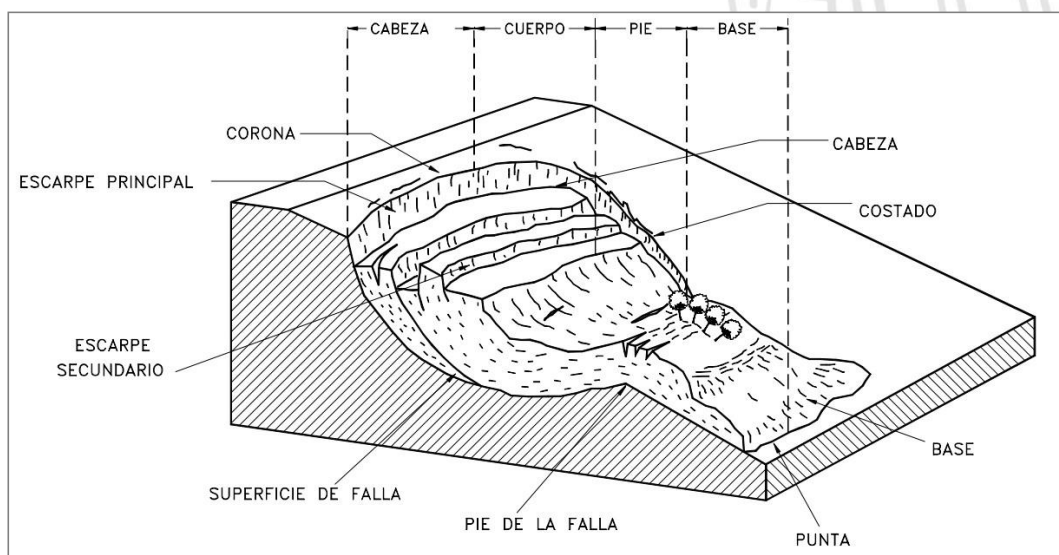


Figura 4. Nomenclatura de un deslizamiento. Fuente: (Suárez, 1998).

Se ha determinado que la pendiente es la variable geométrica más crucial al momento de evaluar la estabilidad de taludes y laderas. La variable se relaciona directamente con las tensiones de cortes tangenciales y normales en la formación superficial y en suelos, e influye también en las tasas de infiltración de agua en la ladera (Santacana, 2001). La Figura 5 explica la forma como se obtiene el parámetro pendiente a partir de una nube de puntos de datos LiDAR, los cuales se organizan de acuerdo con las variables espaciales definidas, que posteriormente se procesan para generar una

imagen ráster denominada Modelo Digital de Elevación que luego sirve de insumo para crear el mapa de pendientes reclasificado mediante la herramienta Pendiente de ArcGIS.

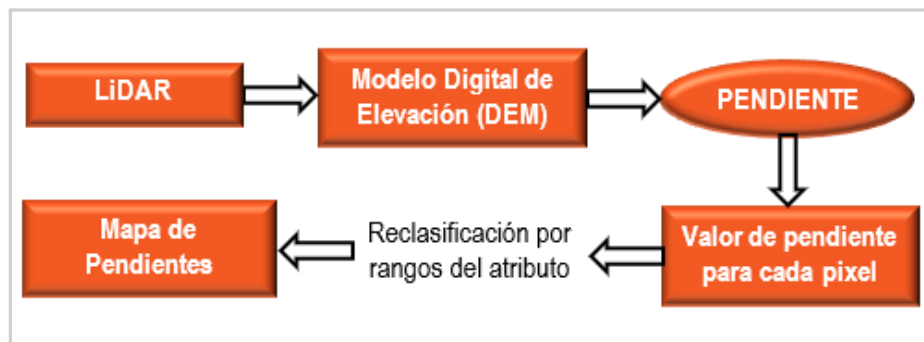


Figura 5. Procedimiento para la obtención del mapa de pendientes. Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2013).

Según el Servicio Geológico Colombiano (2013), la importancia de evaluar la cobertura de la tierra dentro del análisis de las causas de un deslizamiento radica en la influencia sobre factores como la humedad del suelo, la relación de la humedad con la precipitación, el tipo de paisaje en el que se desarrolla, entre otras. El tipo, la densidad, la capacidad de interceptación de agua lluvia y el área de protección de cobertura vegetal constituye un factor de resistencia o favorecimiento de procesos morfodinámicos como la erosión y los movimientos en masa.

En áreas de alta pendiente y de coberturas vegetales de ciclos biológicos muy lentos y frágiles, toda intervención de estas hace que se aumente la susceptibilidad, indicando una menor evapotranspiración, lo cual puede perjudicar la condición de estabilidad de los terrenos en la medida que sale menor cantidad de humedad de los suelos y de la cobertura aumentando los efectos de saturación de los suelos (Servicio Geológico Colombiano, 2013). Para conocer de manera aproximada la cantidad de agua que las coberturas extraen del suelo, se presentan los valores del coeficiente único del cultivo (K_c) que es una variable derivada de la evapotranspiración del terreno y directamente proporcional a ella, es decir, a medida que aumenta K_c , la evapotranspiración será mayor.

Tabla 1. Coeficiente de cobertura para diferentes coberturas vegetales*.

Categoría	Clases de Cobertura de tierra	K_c
Cobertura mayormente transformada	Áreas urbanas	0.2
	Áreas mayormente alteradas	1
Cobertura de agroecosistemas	Cultivos anuales o transitorios	0.9-1.15
	Cultivos semipermanentes y permanentes	1-1.25
	Pastos	1
	Áreas agrícolas heterogéneas	1
	Áreas agroforestales	0.8-1.1
	Bosques plantados	0.6-1
	Bosques naturales	0.6
	Vegetación secundaria	0.6-0.9

Coberturas mayormente naturales	Arbustales	0.3-1.1
	Herbazales	0.3-1.1

	Zonas desnudas, sin o con poca vegetación	1
	Afloramientos rocosos	1
	Glaciares y nieves	0.2
Cobertura de áreas húmedas continentales y costeras	Hidrofitia continental	1.2
	Herbáceas y arbustivas costeras	1.2
Superficies de agua	Aguas continentales naturales	1.05
	Aguas continentales artificiales	1.05
	Aguas marinas	1.05
	Lagunas costeras	1.05
Sin información	Nubes	--
	Sombra de nubes	--

**(Tomado de la serie de Riego y Drenaje de la FAO No.56. Evapotranspiración del Cultivo, 2006).*

Asimismo, la importancia de estudiar la relación lluvia-deslizamiento se fundamenta en que los procesos de remoción en masa generados por precipitaciones es una de las amenazas de tipo natural que ha generado importantes consecuencias en numerosas partes del mundo. Uno de los aspectos a considerar para el establecimiento de un sistema de alerta temprana es la base de conocimiento del mismo, es decir, es necesario, entre otras variables, determinar de qué manera se relaciona la precipitación con la generación de deslizamientos en un sitio dado. Una parte de los procesos de remoción en masa generados por lluvia se presentan debido al incremento en la presión de poros en el talud y las condiciones que favorecen o no la generación de deslizamientos se relacionan con las características de los materiales geológicos, historia de la lluvia y geometría del talud, entre otros (Wieczorek, 1996). A continuación, se reporta una tabla con algunas de las variables derivadas de registros de precipitación asociados con deslizamientos:

Tabla 2. Definiciones de tipo de variable de precipitación para la iniciación de deslizamientos*.

Variabl e	Descripci ón	Unidad es
A_d	Lluvia antecedente: lluvia total acumulada medida antes del deslizamiento en un periodo determinado en días.	mm
R	Lluvia diaria: cantidad total de lluvia para el día del evento de deslizamiento	mm
A_dD	Lluvia antecedente – Duración de la lluvia	mm-h o mm-d
EA₃₀ d	Evento de lluvia acumulativa – Lluvia antecedente de 30 días	mm-mm
IE	Intensidad de lluvia – Evento de lluvia acumulativa	mm/h-mm

**(Tomado del informe de Niveles umbrales de lluvia que generan deslizamientos: una revisión crítica, Ramos et al., 2015).*

La integración de la información de la caracterización geotécnica con la información de tipo hidrológico y con las nuevas aplicaciones tecnológicas, permiten generar modelos de análisis para predecir deslizamientos en determinado terreno con cierto grado de confiabilidad. Estos modelos pueden ser ejecutados mediante algoritmos fundamentados en reglas asignadas por un ingeniero experto, desarrollándose así

un sistema de alertas tempranas de deslizamientos basado en un modelo de inteligencia artificial, alimentado por la información obtenida de mapas topográficos (tecnología LiDAR), mapas de tipo de suelos (geología y geotecnia) y coberturas, mapas de precipitaciones e información bibliográfica relacionada con las reglas que gobiernan el algoritmo.

Para lograr lo anteriormente descrito es sumamente necesario entender el concepto de inteligencia artificial, la cual se concibe como una rama de la ciencia de la computación que comprende el estudio y la creación de sistemas computarizados que manifiestan cierta forma de inteligencia. Dicho de otra forma, es una rama de la ciencia de la informática dedicada al estudio de agentes racionales no vivos. Se trata de la construcción de sistemas capaces, no solo de tratar datos sino de aprender conceptos y tareas por si solos, capaces de razonar y de llevar a cabo conclusiones lógicas que los lleven a nuevas tareas (Barceló, 2001). Existen numerosos modelos de inteligencia artificial que son aplicados a diferentes procesos en las empresas para optimizar recursos, tomar decisiones eficientes, generar ganancias, entre otros, y algunos algoritmos son mejores para tratar cierto tipo de problema que otros. Dentro de los algoritmos de Inteligencia Artificial más comúnmente utilizados según Barceló (2001) se encuentran:

- ✓ Árboles de decisión
- ✓ Naive Bayes
- ✓ Bagging y Random forest
- ✓ Redes neuronales
- ✓ Sistemas de expertos
- ✓ Teoría del caos
- ✓ Sistemas fractales



Metodología

Para el desarrollo de los objetivos propuestos se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- **Definición de los parámetros que intervienen en la susceptibilidad general del terreno a los deslizamientos de tierra:** El primer paso fue realizar una investigación exhaustiva en la literatura académica a cerca de los parámetros detonantes en un movimiento de masa. Se revisaron informes, tesis, publicaciones y artículos científicos a los que se tiene acceso desde las licencias adjudicadas a la compañía y a la universidad. Con ello, se compiló la información necesaria y posteriormente, en una reunión programada con los ingenieros coordinadores del proyecto, se seleccionaron aquellas variables que tienen la mayor influencia en la estabilidad general de un terreno.
- **Recopilación de información geotécnica de líneas de transmisión y subestaciones a través de los proyectos existentes y en construcción, así como en los registros de mantenimiento:** En primer lugar, se solicitó al BIT (Banco de Información Técnica), toda la información relacionada con los estudios de suelos y diseño de cimentaciones para cada una de las líneas en mención, organizadas por CTE (Centros de Transmisión de Energía). Este proceso debió hacerse paulatinamente, ya que se trataba de un volumen extenso de datos y se podía incurrir en sobresaturación de las carpetas compartidas para consignar toda la información. Los archivos recolectados fueron de tipo texto en formato PDF y Word, así como algunos fragmentos de informes y planos en formato de imagen.
- **Revisión y clasificación de la información recopilada según la ubicación de cada línea de transmisión:** Toda la información suministrada por el BIT en las carpetas compartidas, fue inicialmente organizada según los CTE y posteriormente se realizó un primer filtro seleccionando aquella información relacionada netamente con aspectos geológicos y geotécnicos y suprimiendo aquella relacionada con estudios de impacto ambiental del suelo, informes catastrales, estudios de prefactibilidad de los terrenos, entre otros, que no aportaban datos de importancia para la finalidad del proyecto.
- **Depuración y filtrado de la información recolectada teniendo en cuenta los parámetros geotécnicos definidos:** Secuencialmente, se prosiguió con la segunda depuración de la información, filtrando aquella que fuera útil para construir una base de datos convencional sintetizando los aspectos fundamentales y las principales características del terreno y la fundación de cada sitio de torre del que se tenía información disponible. Se procuró incluir los parámetros geotécnicos de cada estrato de suelo encontrado, las características de resistencia, algunas propiedades químicas e hidráulicas, el tipo de cimentación de cada pata de la torre, así como observaciones puntuales sobre antiguos sucesos ocurridos en el terreno o particularidades de este.
- **Diseño y alimentación de la base de datos con la información procesada según los parámetros requeridos:** La base de datos adoptada consistió en una macro-tabla de Excel, cuya estructura fue construida con previa aprobación de los coordinadores del proyecto y

guardando fidelidad a los formatos empleados por la compañía. Se denominó como Tabla de Suelos, la cual incluía los siguientes campos: Número de torre, CTE responsable, Estratos 1 – 5 (espesor [m], tipo de suelo, Cohesión [KPa], ángulo de fricción ϕ [°], peso unitario γ [kN/m³]), capacidad admisible [kg/cm²], PH, Resistividad [Ω -m], Condición de sumergencia del suelo, Nivel de aguas freáticas, cruce de cuerpos de agua, Tipo de cimentación (por cada pata: A, B, C, D), observaciones. Cabe resaltar que se realizó una Tabla de Suelos para cada Línea de Transmisión, pero sin alterar su formato ni

estructura. Una vez definida la base de datos, se continuó con la alimentación de dicha tabla para un total de 50 líneas de transmisión que corresponden al 50% de las líneas operadas por INTERCOLOMBIA S.A E.S.P y cuyo porcentaje constituía la meta del proyecto de práctica para el semestre en curso. Este proceso de completar la base de datos se ejecutó con especial cuidado, procurando incluir toda la información explícita previamente compartida por el BIT, y para aquellos campos en los que no se tenía información se emplearon correlaciones que relacionaban otros datos reportados en los estudios de suelos e informes de diseño de cimentaciones.

- **Solicitud y recolección de información de tipo geomorfológico, topográfico e hidrológico:** Con el fin de evaluar la incidencia de diferentes parámetros en la detonación de los movimientos en masa, y enriquecer el modelo que se había propuesto, se solicitó información de mapas de suelos, mapas geomorfológicos, mapas topográficos con pendientes y curvaturas, mapas de coberturas e historiales de precipitaciones con diferentes fuentes como el IDEAM, el IGAC, la NASA y algunos proyectos que se encuentran desarrollando dentro de la compañía y a los cuales se tenía acceso a la información. Se realizó un tratamiento de los datos suministrados, evaluando la escala espaciotemporal de cada archivo, buscando en cada caso, la mayor precisión en los parámetros medidos.
- **Generación de los mapas por cada parámetro considerado en el análisis de susceptibilidad:** Con la información y los datos previamente seleccionados, clasificados y organizados, se procedió a la elaboración de los mapas de cada uno de los parámetros, en un formato de almacenamiento vectorial digital tipo ráster compatible con el software (Sistemas de Información Geográfica) en el cual se realizó el análisis comparativo de cada variable, teniendo en cuenta las áreas de influencia del modelo y la resolución de los píxeles empleados. Se determinó entonces, un área circular de estudio por cada sitio de torre, y una buena resolución de píxeles por cada mapa generado, con el fin de obtener un análisis sectorizado más preciso y refinado.
- **Estructuración del algoritmo base para el desarrollo del modelo basado en analítica predictiva e inteligencia artificial con las respectivas reglas de iteración:** A partir de otros proyectos que se han venido desarrollando dentro del marco de la Inteligencia Artificial al interior de la compañía, se logró contactar con los ingenieros físicos encargados de la formulación de estos modelos, quienes finalmente apoyarían en la definición y estructuración del sistema de alertas tempranas de deslizamientos. En numerosas reuniones se presentaron los lineamientos, requerimientos, resultados esperados e importancia del proyecto a desarrollar, así como la información disponible para su puesta en marcha, y finalmente, luego de un arduo trabajo colaborativo, se logró determinar el modelo que mejor se ajustaba a las solicitudes presentadas, evaluando la precisión y la posibilidad de refinamiento y expansión del sistema de alertas tempranas a proyectos futuros.
- **Selección de las reglas que rigen el algoritmo del modelo de acuerdo con la información recolectada y con los registros antecedentes:** Para determinar las reglas que regirían el algoritmo, primero fue necesario una exhaustiva investigación en la literatura disponible sobre la cuantificación

de los parámetros a considerar en el modelo, con el fin de definir los umbrales e intervalos de acuerdo a la matriz de riesgos empleada en los proyectos de la compañía para la determinación del estado de los activos. Una vez establecidos los intervalos para cada variable se prosiguió a su evaluación mediante los

registros y la información precedente a cerca de sucesos relacionados con movimientos de masa en determinados sitios de torre. Finalmente, el grupo de expertos, compuesto por ingenieros civiles y especialistas en el área de la geotecnia, definió las reglas que mejor fundamentaban el modelo.

- **Reporte y documentación de avances en el desarrollo metodológico del sistema de alertas tempranas de deslizamientos:** Se agendaron reuniones paulatinas cada semana con los coordinadores del proyecto con el fin de revisar constantemente la estructuración del algoritmo, aclarar dudas, discutir sobre asuntos concernientes al modelo, reevaluar los lineamientos y proponer ideas que ayudaran a la ejecución eficiente del proyecto. Asimismo, se presentaron los avances de las actividades en los grupos primarios programados cada mes por la Dirección de Mantenimiento.
- **Presentación final del modelo junto con el entregable solicitado:** En la reunión de clausura de Prácticas académicas programada por la Gerencia, se presentó el paso a paso de la ejecución del proyecto, los objetivos alcanzados, así como las dificultades encontradas durante su desarrollo. Como recurso entregable se realizó un artículo científico sintetizando el trabajo ejecutado durante el semestre de práctica y haciendo énfasis en el sistema de alertas tempranas de deslizamientos. Dicho artículo se encuentra bajo propiedad intelectual de la compañía y es susceptible de publicación en las plataformas y eventos desarrollados por ISA, así como en revistas científicas de universidades con las cuales se tiene vínculo.

Resultados y Análisis

Definición de los parámetros que intervienen en la susceptibilidad general del terreno a los deslizamientos de tierra: Se estableció que los parámetros determinantes en la estabilidad del suelo son principalmente los que se presentan en la figura 6 y que se describen a continuación: En primer lugar, la pendiente del terreno, la cual está muy relacionada con la aparición de movimientos en masa dado que es el principal factor geométrico que aparece en los análisis de estabilidad y es una de las principales condiciones para que ocurra un deslizamiento porque determina los esfuerzos cortantes y normales generados en la masa de suelo. En segundo lugar, pero no menos importante, se encuentra el tipo de suelo, en lo que se refiere a si se trata de un suelo cohesivo o granular y a su distribución en el perfil estratigráfico del terreno, lo que condiciona el comportamiento mecánico del suelo; dentro de este parámetro se relaciona también la existencia o no del nivel de aguas freáticas en el terreno, ya que de esto depende si se realiza un análisis bajo condición drenada (a largo plazo) o condición no drenada (a corto plazo). Otro de los parámetros definidos es la cobertura presente en el área de estudio, y no solamente en lo que se refiere al tipo de cobertura vegetal, sino también al uso del suelo en determinado sitio; puesto que de esta variable depende el proceso de evapotranspiración del terreno que, a su vez, se relaciona directamente con la condición de saturación del suelo. Y finalmente, se hizo sumamente necesario considerar el parámetro precipitación, puesto que este factor determina el aumento de la fuerza de infiltración específica en el terreno, y por ende, la estabilidad del talud. De la correcta integración y valoración de estos parámetros, depende la precisión y confiabilidad del modelo de susceptibilidad a deslizamientos en el terreno.

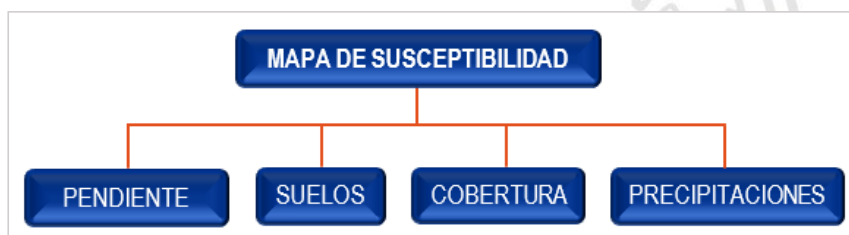


Figura 6. Parámetros definidos para el modelo. Fuente: *(Elaboración propia)*.

Recopilación de información geotécnica de líneas de transmisión y subestaciones a través de los proyectos existentes y en construcción, así como en los registros de mantenimiento: Toda la información solicitada al Banco de Información Técnica (BIT) de la compañía fue compartida en una carpeta pública para su posterior y fácil acceso, ya que se trataba de un volumen extenso de información. Los informes compartidos correspondían a estudios de suelos y ensayos de laboratorio, sondeos y exploraciones de campo, diseños de cimentaciones y obras civiles, estudios de reforestación e impacto ambiental, planos de planta-perfil de las líneas de transmisión, estudios de viabilidad de variantes, planos topográficos, estudios de suelos específicos para determinadas torres, informes catastrales y registros de mantenimientos en los sitios de torre. Al tratarse de líneas de transmisión muy antiguas, asimismo, los archivos en mención se elaboraron en periodos de hasta hace cuatro décadas y fueron reportados en

formatos tipo texto y algunas imágenes. En la siguiente figura se presenta la ventana de búsqueda de información implementada por el BIT.

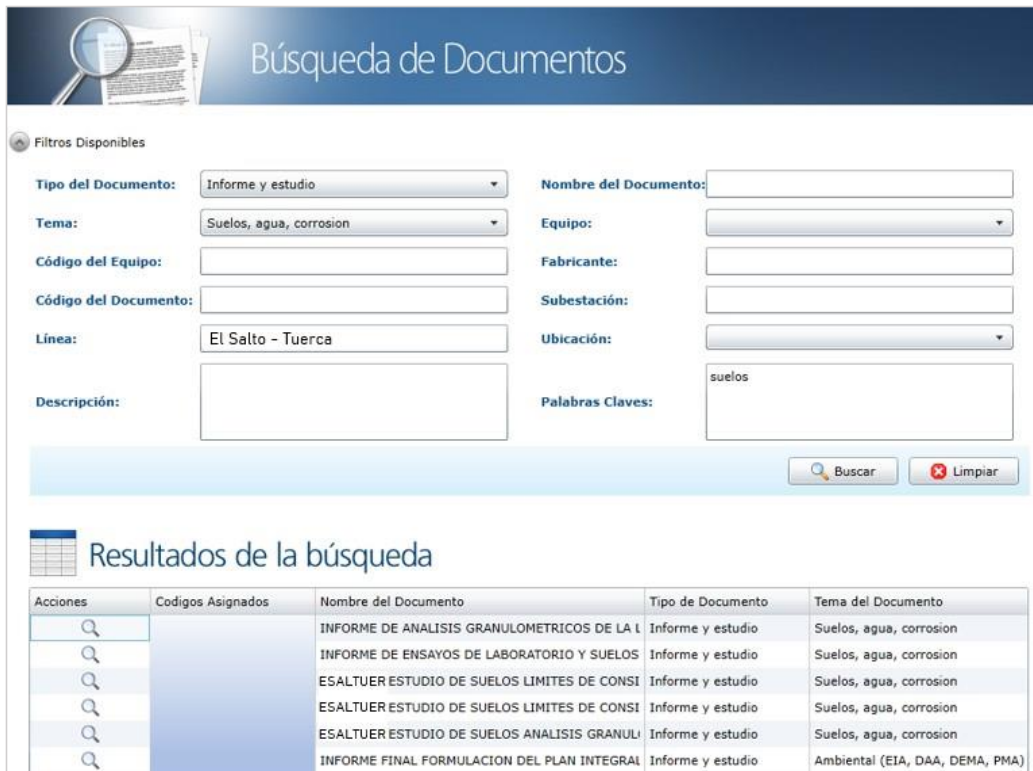
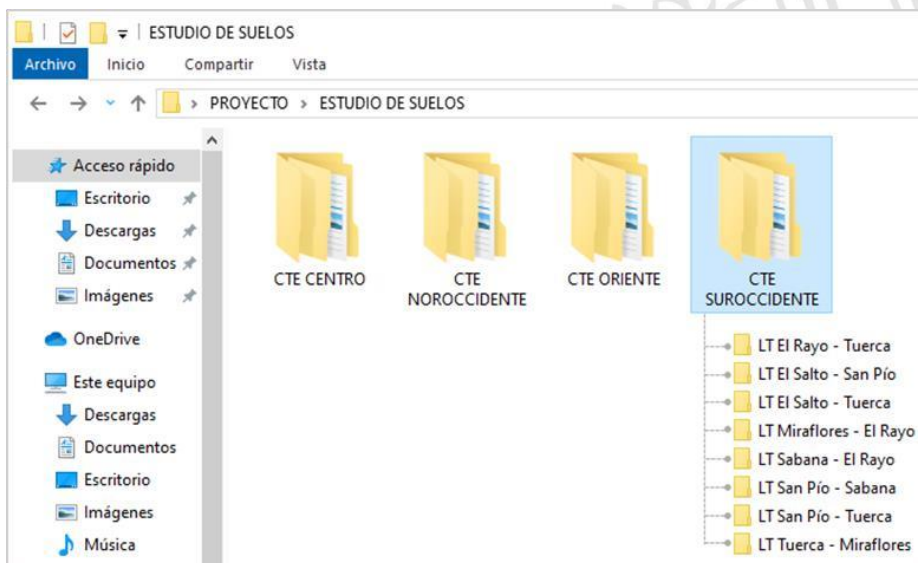


Figura 7. Ventana de búsqueda BIT*.

*(Tomado del Sitio para manejo de la información técnica de ISA, 2019).

Revisión y clasificación de la información recopilada según la ubicación de cada línea de transmisión: Una vez se tuvo toda la información recolectada, se procedió a organizarla y clasificarla en carpetas, primero según el Centro de Transmisión de Energía (CTE) y luego por Línea de Transmisión (LT), esto con el fin de hacerle un tratamiento ordenado a la información y facilitar su fácil acceso en caso de una futura búsqueda o verificación de los datos allí consignados. A



continuación, se muestra la forma cómo se ordenaron las respectivas carpetas en el equipo:

Figura 8. Organización de información por carpetas.

*(Tomado del sitio de almacenamiento de información de ISA, 2019).

A continuación, se identificó por cada CTE el tipo de información presentado para cada una de las líneas de transmisión, encontrándose en algunos casos, informes relacionados con estudios ambientales, catastrales o carencia de información, como se indica en la figura 9. De cada carpeta únicamente se rescató aquellos informes que contenían estudios de suelos y/o diseño de cimentaciones que posteriormente servirían para la caracterización geotécnica de los sitios de torre. Cabe resaltar que, a diferencia de como se pensaba antes de dar inicio al proyecto, la información recolectada sobre estudios de suelos y diseño de cimentaciones para las líneas de transmisión operadas por INTERCOLOMBIA fue poca y en muchos casos incompleta, sin embargo, se pudieron caracterizar los sitios de torre que poseían información disponible.

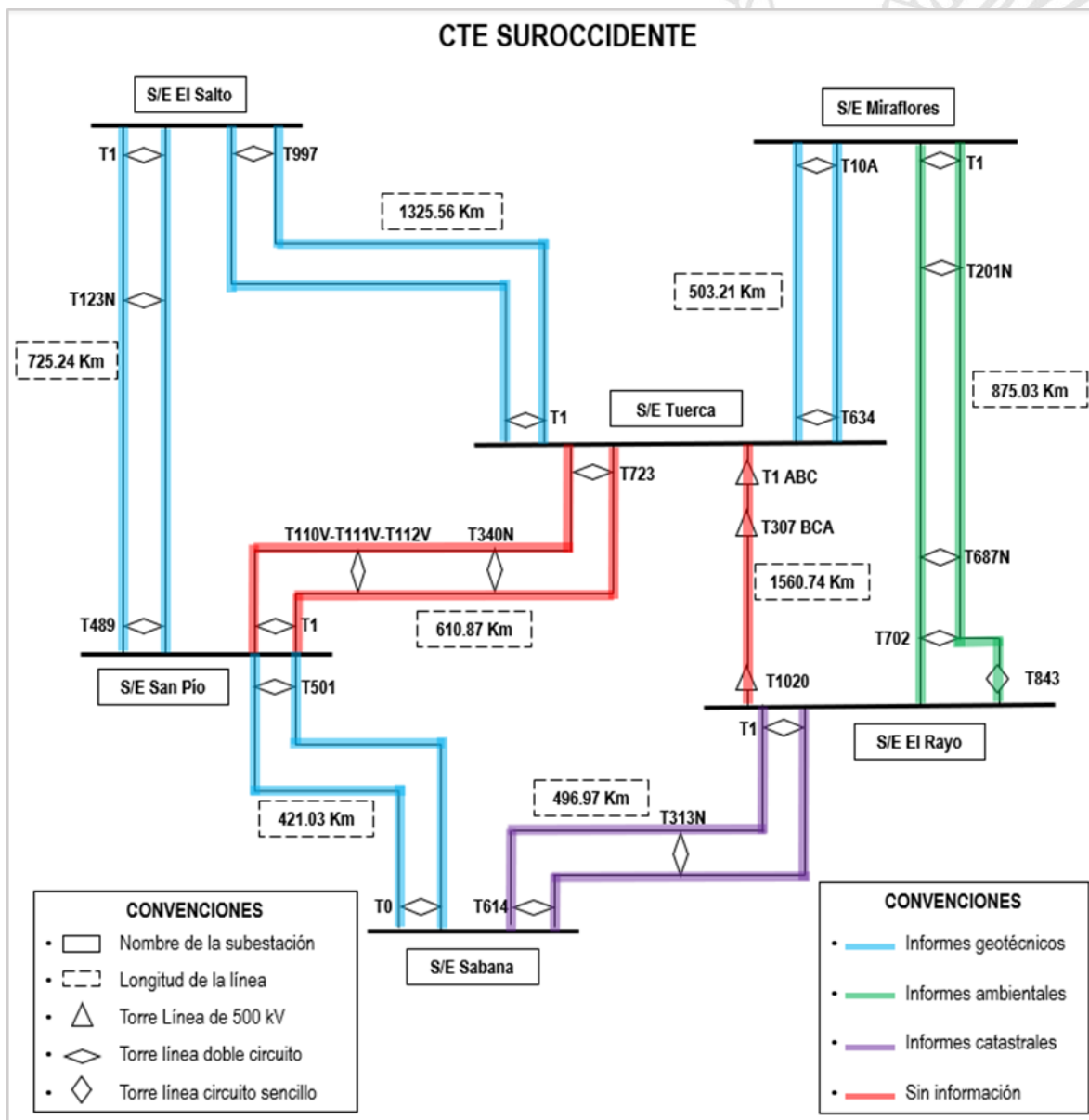


Figura 9. Tipo de información recolectada por CTE. Fuente: (Elaboración propia).

Depuración y filtrado de la información recolectada teniendo en cuenta los parámetros geotécnicos definidos: Se lograron revisar minuciosamente cada uno de los archivos previamente clasificados y de acuerdo con la información reportada se seleccionaron los parámetros que incluiría la

Tabla de Suelos para la caracterización geotécnica de los sitios de torre. En primer lugar, se eligieron parámetros relacionados con la numeración y la ubicación de las torres en cada CTE y seguidamente se recopilaron datos derivados de los estudios de suelos y ensayos realizados en los sitios de torre, de acuerdo con la disponibilidad de información que se tenía. Tuvo que realizarse un filtro detallado de la información, ya que se contaba en algunos casos con información poca o muy básica y en otros casos, con datos redundantes y muy específicos, así que se procuró reportar la información precisa y suficiente para finalmente obtener una correcta caracterización geotécnica con los siguientes parámetros a saber:

- | | |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| → Número de Torre | → Resistividad |
| → CTE Responsable | → Condición del Suelo |
| → Estratos (Capacidad admisible, cohesión, ángulo de fricción) | → Nivel Freático |
| → Capacidad admisible | → Cruce cuerpo de agua |
| → PH | → Tipo de cimentación por cada pata |
| | → Observaciones |

Como se mencionó anteriormente, con el fin de poder conocer las propiedades geomecánicas y físicas de un determinado terreno, estos son los mínimos parámetros que deben considerarse en la caracterización geomecánica de los sitios de torre para su posterior modelamiento en los análisis concernientes a la Mecánica de Suelos.

Diseño y alimentación de la base de datos con la información procesada según los parámetros requeridos: La construcción de la base de datos se completó gracias a la información previamente clasificada, organizada y seleccionada sobre estudios de suelos y diseño de cimentaciones para las líneas de transmisión operadas por INTERCOLOMBIA. La Tabla de Suelos se elaboró de la manera más simple y compresible, de acuerdo con los lineamientos de diseño y formato estipulados por la compañía, asimismo, se procuró que guardara todos los datos requeridos para la caracterización geotécnica de los sitios de torre y que el acceso a dicha información fuera ágil y rápido ante futuras revisiones o verificaciones. De esta manera, se garantizó un avance importante en la digitalización de la información y la automatización de los procesos en la Dirección de Mantenimiento.

Como se indicó, la base de datos consistió en una Tabla de Suelos en formato macro de Excel, donde por cada hoja se reportó una Línea de Transmisión, como se observa en la figura 10.

N° TORRE	CÓDIGO SAP	CTE RESPONSABLE	ESTRATO 1				ESTRATO 2				ESTRATO 3						
			ESPESOR (m)	TIPO SUELO	C (KPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	ESPESOR (m)	TIPO SUELO	C (KPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	ESPESOR (m)	TIPO SUELO	C (KPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)
1	1455610	Suroccidente	0.30	arcilla	30	8	17.80	2.20	arcilla limosa	25	12	18.30	2.00	arena	0	35	18.90
2	1455611	Suroccidente	0.45	arcilla	25	10	18.70	2.50	arcilla limosa	22	15	19.10	1.55	arena	0	37	18.90
3	1455612	Suroccidente	0.70	limo arcilloso	18	30	18.10	2.10	limo	12	32	18.50	1.70	limo	10	31	17.70
4	1455613	Suroccidente	0.90	limo arcilloso	19	31	17.90	2.20	limo	9	31	17.20	1.40	limo	8	32	18.40
5	1455614	Suroccidente	1.00	limo arcilloso	17	28	18.30	2.10	limo arcilloso	15	29	17.60	1.40	limo	9	30	17.80
6	1455615	Suroccidente	1.50	arena	0	39	19.20	3.00	gravas	0	38	18.70					
7	1455616	Suroccidente	1.70	arena	0	41	19.30	2.80	gravas	0	38	18.90					
8	1455617	Suroccidente	1.30	arcilla	24	12	16.50	1.70	arcilla limosa	28	12	17.90	1.50	arena	0	41	19.80
9	1455618	Suroccidente	1.10	arcilla	30	9	18.40	1.90	arena	2	39	18.60	1.50	arena	0	34	18.90
10	1455619	Suroccidente	0.90	arcilla limosa	23	8	16.90	2.00	arena	0	27	18.30	2.00	arena	0	38	19.70

CAPACIDAD ADM. (Kg/cm ²)	PH	RESISTIVIDAD (Ω -m)	CONDICIÓN DEL SUELO	NF (m)	CRUCE CUERPO DE AGUA	TIPO CIMENTACIÓN				OBSERVACIONES
						PATA A	PATA B	PATA C	PATA D	
1.50	5.50	121.40	seco			Zapata	Zapata	Zapata	Zapata	
1.70	6.00	121.40	seco			Zapata	Zapata	Zapata	Zapata	
2.00	5.70	28.00	seco			Parrilla	Parrilla	Parrilla	Parrilla	Antiguo deslizamiento
1.50	5.50	28.00	seco		Río Azul	Zapata	Zapata	Zapata	Zapata	
1.50	6.10	21.70	sumergido	1.50		Pilote	Pilote	Pilote	Pilote	
1.80	5.20	72.80	seco			Zapata	Zapata	Zapata	Zapata	
1.90	6.00	41.10	seco		Quebrada la Luz	Pila	Zapata	Zapata	Zapata	Presencia cárcavas
2.00	5.50	61.80	sumergido	2.30		Zapata	Zapata	Zapata	Zapata	
1.70	5.00	2.67	seco			Parrilla	Parrilla	Parrilla	Parrilla	
1.50	5.00	11.67	seco			Zapata	Zapata	Zapata	Zapata	

Figura 10. Formato Tabla de Suelos. Fuente: (Elaboración propia).

Solicitud y recolección de información de tipo geomorfológico, topográfico e hidrológico: Para la estructuración del sistema de alertas tempranas de deslizamientos se evaluaron los parámetros que debían incluirse en el análisis y se determinó que la pendiente, la cobertura, el tipo de suelo y la precipitación eran los principales agentes que intervienen en el desencadenamiento de movimientos de masa. Por cada uno de estos parámetros se requería de algún tipo de información que sirviera de insumo para alimentar el algoritmo que configuraba el modelo de Inteligencia Artificial, por lo que se solicitaron los siguientes archivos en diferentes bases de información geográfica disponibles:

- ✓ Mapa de Pendientes Nacional, Escala 1:100.000, formato tipo ráster, Elaborado en ArcGIS a partir del Mapa de Curvas de Nivel suministrado por el Sistema de Información Geográfica para la planeación y el Ordenamiento Territorial Nacional (SIG-OT)



Figura 11. Interfaz para la descarga de información de cartografía base.
 *(Tomado de Explorador de Capas, datos espaciales, SIG-OT, 2019).

- ✓ Mapa de Suelos por departamentos, Escala 1:100.000, formato tipo ráster. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)

Cubrimiento Departamental

Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000.

Los Levantamientos Generales de Suelos de los departamentos del Territorio Colombiano suministran información importante acerca del recurso suelo; a través de la descripción e interpretación de su génesis, características físicas, químicas, mineralógicas, morfológicas, taxonomía y distribución, como base para la determinación de sus potencialidades y limitaciones de uso.

Título	Shapefile	Metadato
Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Amazonas		
Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Antioquia		
Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Arauca		
Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Atlántico		
Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Bolívar		
Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Boyacá		

Figura 12. Interfaz para la descarga de información de suelos.
 *(Tomado de Datos abiertos, Subdirección de Agrología, IGAC, 2019).

- ✓ Mapa de Coberturas Nacional, Escala 1:8.500.000, formato tipo ráster. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

Catalogo de mapas

(1 of 1) << 1 >>

Tema ↕ Seleccione un tema	Subtema ↕ Seleccione un subtema	Nombre de capa ▲	Shape	PDF	Metadato
Biodiversidad	MAPAS COBERTURA TIERRA	Cobertura de la tierra 2000 - 2002			
Biodiversidad	MAPAS COBERTURA TIERRA	Cobertura de la tierra 2005 - 2009			
Biodiversidad	MAPAS COBERTURA TIERRA	Cobertura de la tierra 2010 - 2012			
Biodiversidad	MAPAS COBERTURA TIERRA	Coberturas de la tierra Amazonia 2002			
Biodiversidad	MAPAS COBERTURA TIERRA	Coberturas de la tierra Amazonia 2007			
Biodiversidad	MAPAS COBERTURA TIERRA	Coberturas de la tierra Amazonia 2012			

Figura 13. Interfaz para la descarga de información de coberturas.
 *(Tomado del Catálogo de Mapas, Sistema de Información Ambiental de Colombia, IDEAM, 2012).

- ✓ Mapa de Precipitaciones Nacional, Escala 1: 8.500.000, formato tipo ráster. National Aeronautics and Space Administration (NASA)

EARTHDATA Find a DAAC -

GES DISC Data Collections PRECIPITATION

Atmospheric Composition, Water & Energy Cycles and Climate Variability

Data Collections Showing 1 - 25 of 466 datasets associated with **PRECIPITATION** *

Refine By

Subject Sort ▾

- Aerosols (2)
- Air Quality (35)
- Altitude (41)
- Atmospheric Chemistry (62)
- Atmospheric Phenomena (6)
- More...

Measurement Sort ▾

- Air Temperature (86)
- Atmospheric Heating (27)
- Atmospheric Pressure Measurements

Image	Dataset	Source	Vers
	TRMM (TMPA) Precipitation L3 1 day 0.25 degree x 0.25 degree V7 (TRMM_3B42_Daily 7) Tropical Rainfall Measuring Mission Project	Models/Analyses TMPA	7
	TRMM (TMPA/3B43) Rainfall Estimate L3 1 month 0.25 degree x 0.25 degree V7 (TRMM_3B43 7) Tropical Rainfall Measuring Mission Project	Models/Analyses TMPA	7

Figura 14. Interfaz para la descarga de información de precipitación.
 *(Tomado de Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, Earth Data, NASA, 2019).

Generación de los mapas por cada parámetro considerado en el análisis de susceptibilidad: Durante el desarrollo de esta actividad se determinó, en primera instancia, el área de estudio que se requería analizar por cada sitio de torre, que para este caso y en previo acuerdo con los ingenieros coordinadores del proyecto, se estableció un área circular de 50m de radio alrededor del centro geométrico del sitio de torre y adicionalmente, se propuso como alternativa un área de franja longitudinal alrededor de la línea de transmisión con un ancho de 50m a ambos lados del eje de la misma, como se puede apreciar en la figura 15.

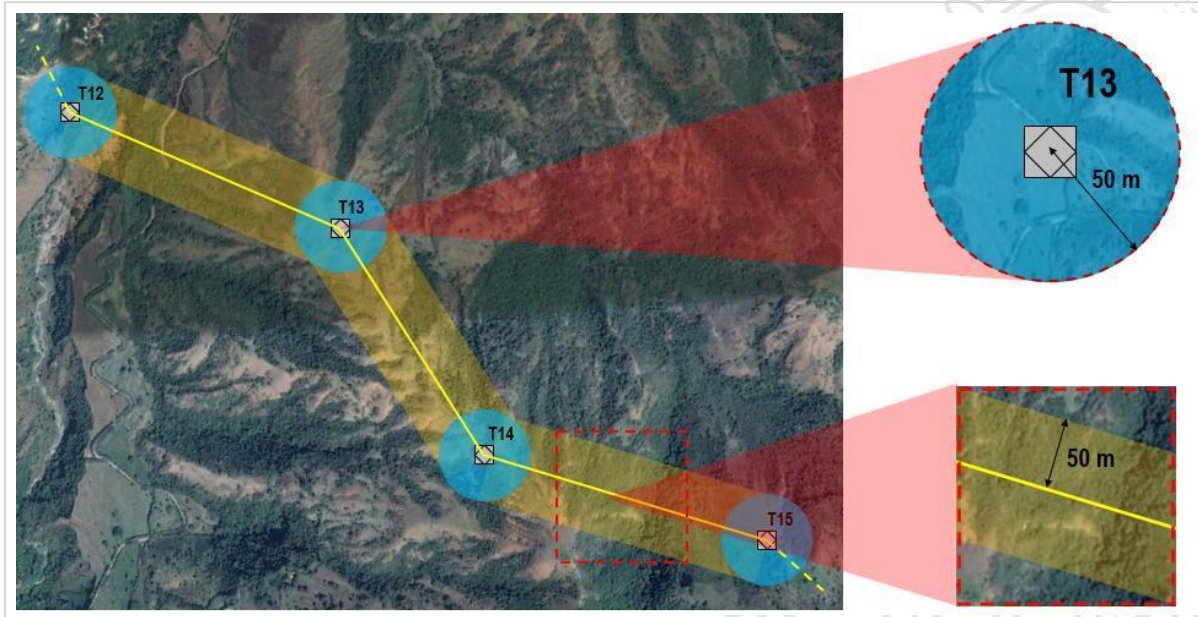


Figura 15. Definición de las áreas de análisis. Fuente: (Elaboración propia).

Luego de esto se generaron los cuatro mapas correspondientes a cada uno de los parámetros previamente definidos con las imágenes tipo ráster descargadas de las diferentes fuentes de información y se unificaron bajo un mismo archivo, con el fin de facilitar el análisis comparativo de las variables en el modelo que se iba a ejecutar con posterioridad.

El mapa de pendientes se reajustó con la nube de datos suministrados en los levantamientos topográficos realizados con LiDAR en diferentes proyectos en los que se ha venido implementando esta nueva tecnología, seleccionando valores de datos en dos de las tres direcciones medidas. El mapa obtenido se esboza en la siguiente figura:

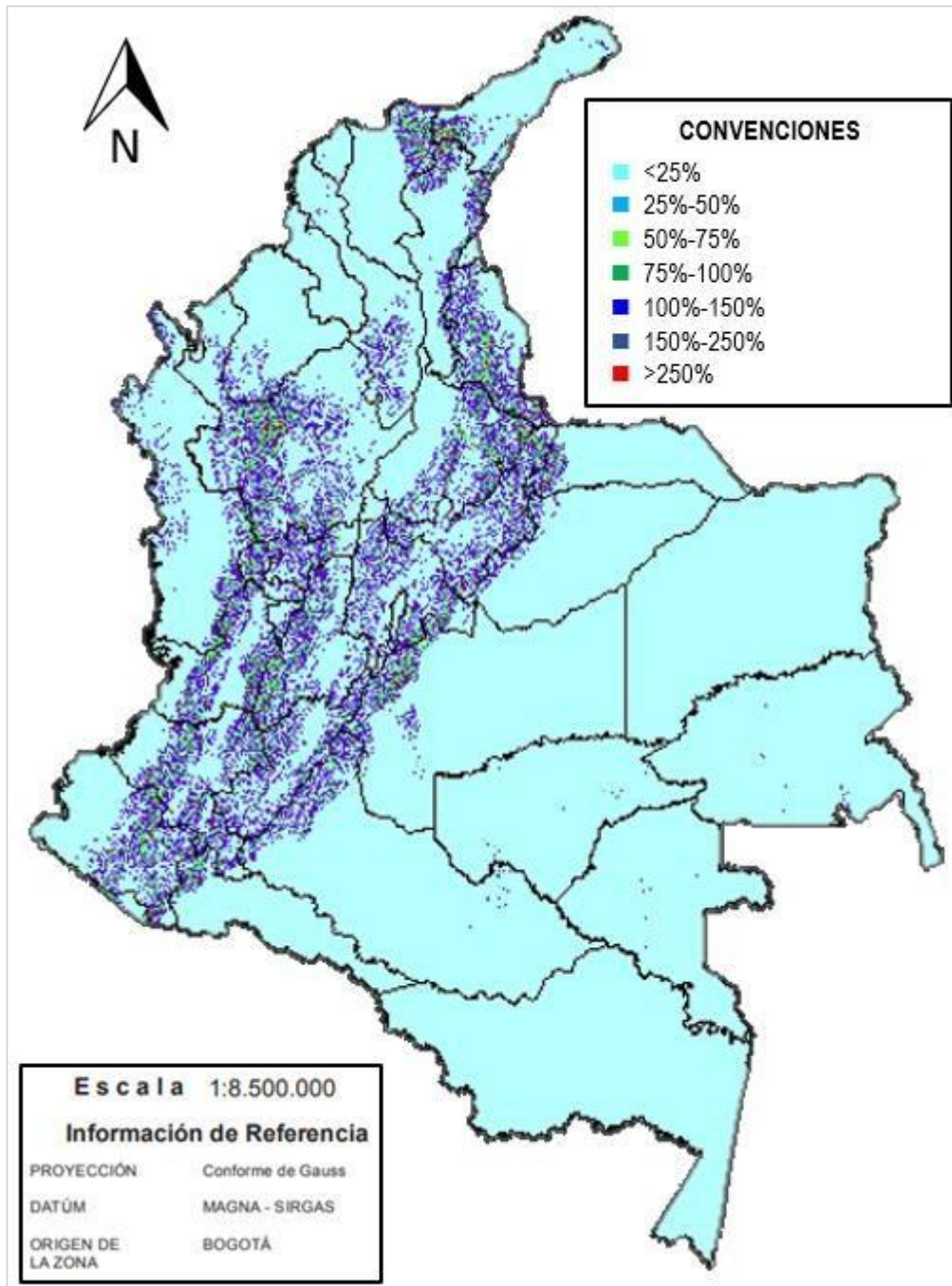


Figura 16. Mapa de pendientes ajustado. Fuente: (Elaboración propia).

Respecto al parámetro Precipitación, se generó el mapa correspondiente a la variable A_d (Lluvia antecedente medida en mm) definida en la Tabla 2 para un día de lluvia comprendido entre el 19 de abril de 2019 a las 00:00:00 horas hasta el 20 de abril de 2019 a las 23:59:59 horas y el resultado obtenido se puede observar en la figura 17:

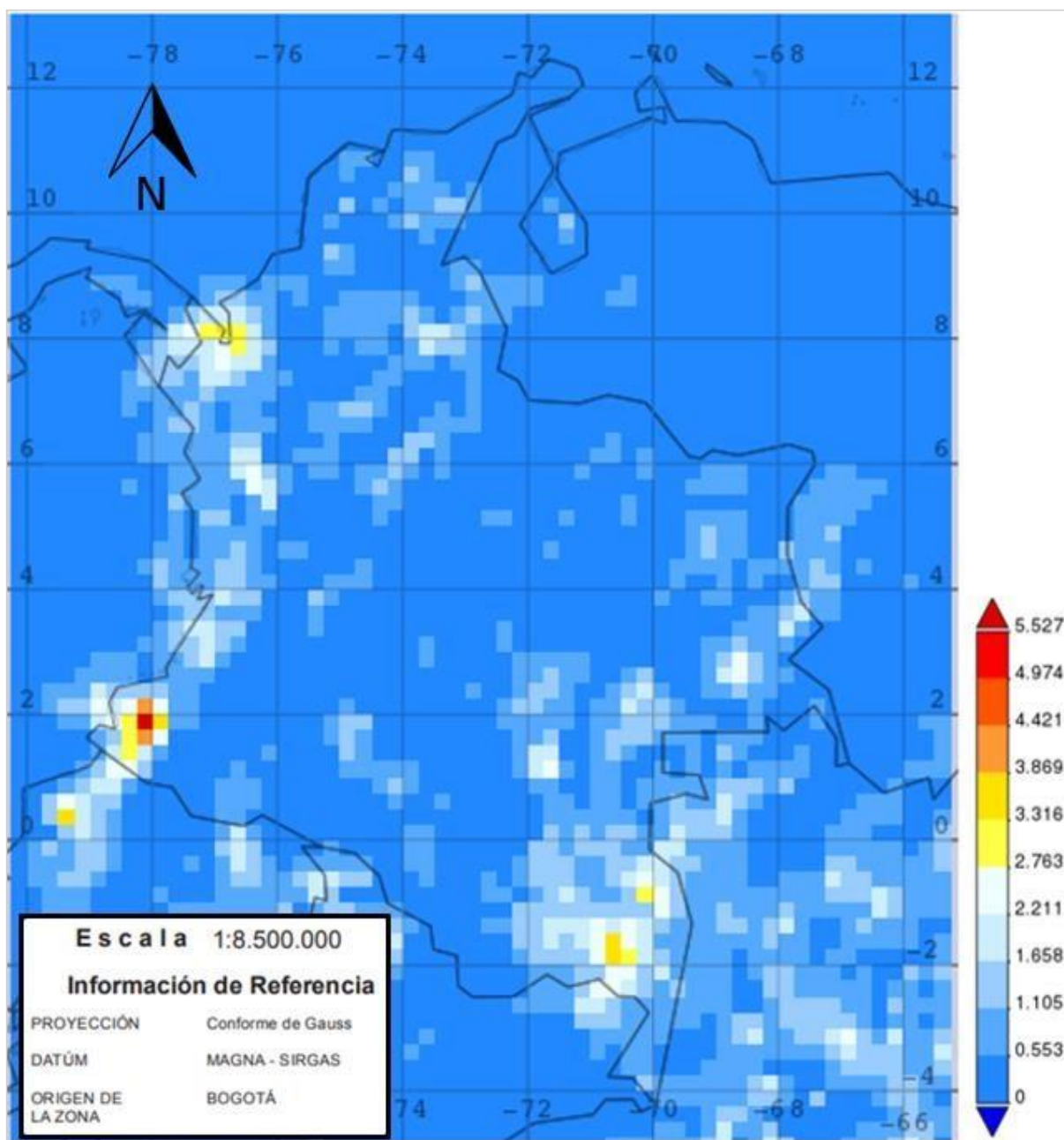


Figura 17. Mapa de precipitaciones. Fuente: (NASA, 2019).

Por otro lado, se pudo integrar la información compilada en la Tabla de Suelos al mapa de suelos suministrado por el IGAC con el propósito de refinar la caracterización geotécnica en la tabla de atributos y así definir un tipo de suelo con mayor precisión en determinadas áreas aferentes a los sitios de torre. El mapa obtenido por departamento se presenta a continuación en la figura 18:

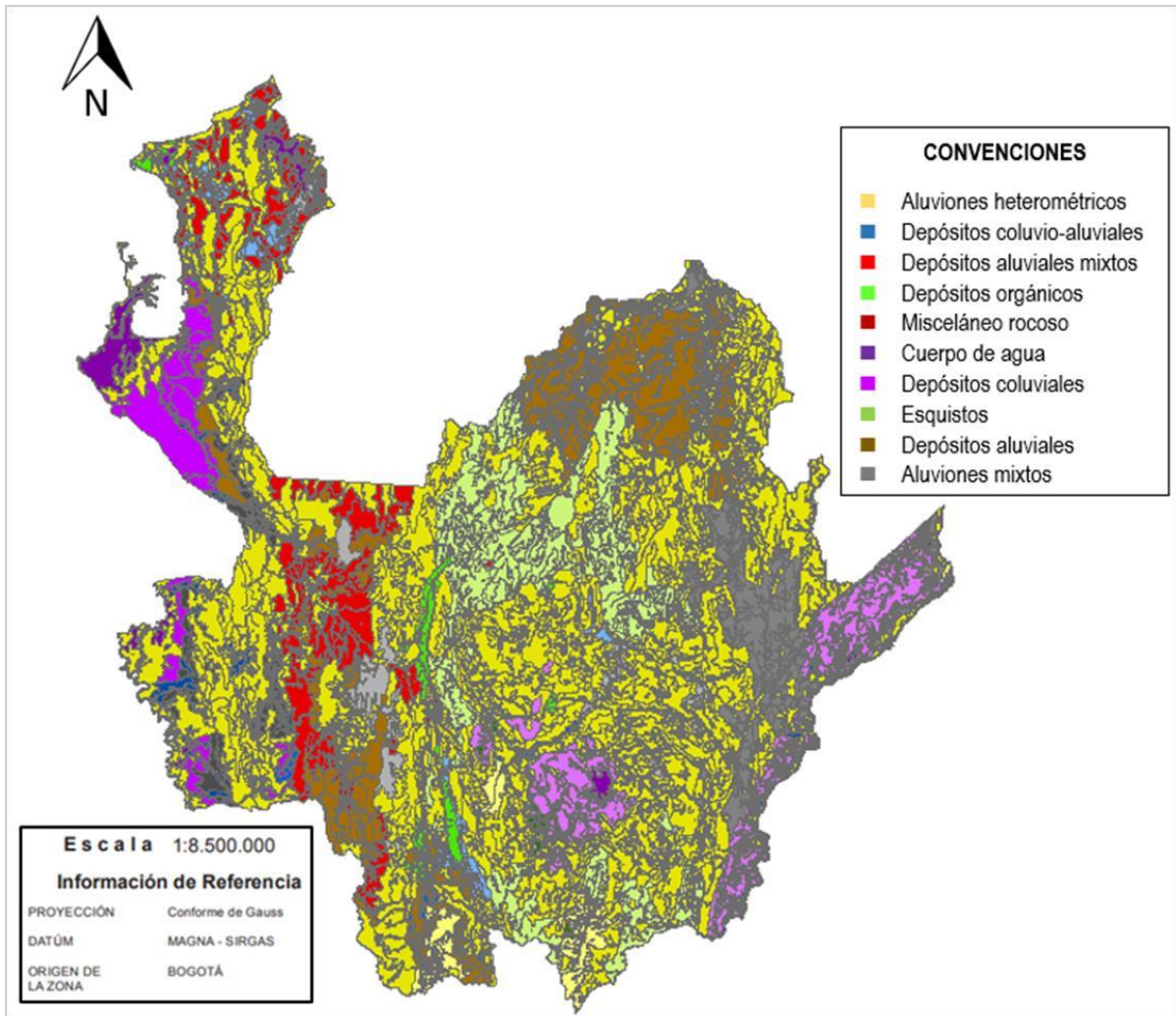


Figura 18. Mapa de suelos ajustado, Departamento de Antioquia. Fuente: (IGAC, 2019).

Finalmente, se muestra en la figura 19 el mapa de coberturas y uso del suelo obtenido a partir del shapefile más actualizado proporcionado por el IDEAM mediante datos recolectados hasta el año 2012.

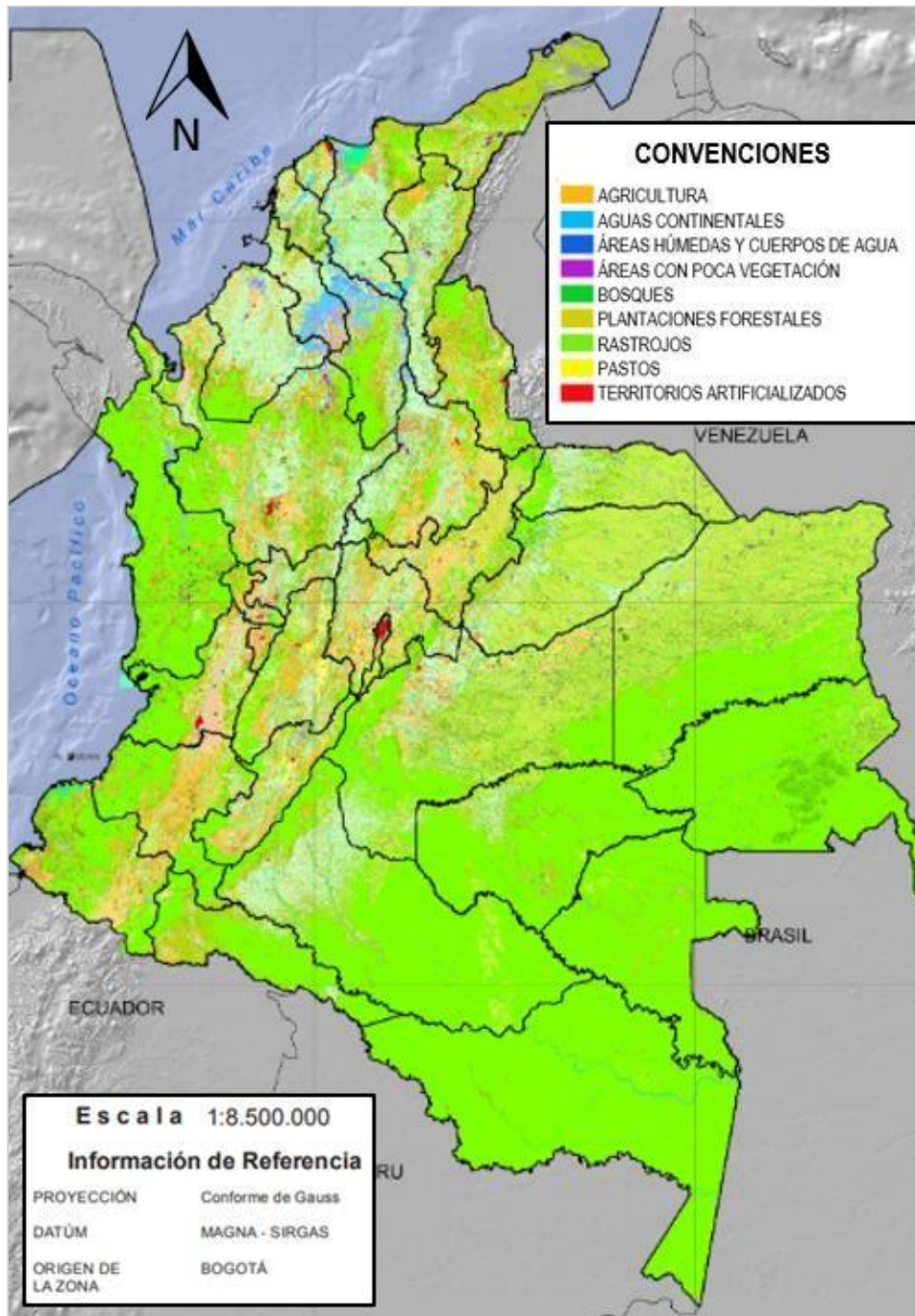


Figura 19. Mapa de coberturas y uso del suelo. Fuente: (IDEAM, 2012).

Estructuración del algoritmo base para el desarrollo del modelo basado en analítica predictiva e inteligencia artificial con las respectivas reglas de iteración: Con la ayuda de los ingenieros físicos de la Dirección de Tecnologías de la Información y luego de varias reuniones, se pudo analizar el tipo de información que se tenía disponible y se definió el modelo que mejor se ajustaba a las solicitudes del proyecto, que para este caso consistió en una red neuronal, la cual es un modelo matemático inspirado en el comportamiento biológico de las neuronas y en cómo éstas se organizan formando la estructura del cerebro. Las redes neuronales son un tipo de modelo de inteligencia artificial que emplea un algoritmo y una nube de información para tomar decisiones o predecir eventos; este tipo de modelos ya había sido empleado en otros proyectos piloto que se han venido desarrollando el último año en la compañía, por lo que pudo ser adaptado fácilmente al sistema de alertas tempranas de deslizamientos que se requería.

Nota: Debido a las políticas de la compañía sobre la utilización y difusión de información, no es posible enfatizar en la estructuración del modelo de inteligencia artificial desarrollado, sin embargo, se presentan las Figuras 21 y 22 donde se bosqueja el resultado obtenido luego de ejecutar la red neuronal.

Selección de las reglas que rigen el algoritmo del modelo acuerdo con la información recolectada y con los registros antecedentes: En la etapa de estructuración del algoritmo fue necesaria la selección y definición de las reglas que se configurarían para su funcionamiento, por lo que debimos realizar investigaciones y consultas a cerca los umbrales que relacionaran cada parámetro previamente definido con la generación de movimientos en masa, asimismo, se precisaron los intervalos de ocurrencia según el nivel de riesgos empleado en la Dirección de Mantenimiento, que puede observarse en la siguiente figura:

Grado de susceptibilidad	Categoría de susceptibilidad	Indicativo de susceptibilidad
Baja	1	
Moderada	2	
Alta	3	
Muy alta	4	

Figura 20. Nivel de riesgos* Fuente: (ISA, 2019).

Una vez definidos los intervalos y los niveles de riesgo, se incorporó dicha información al algoritmo, que, además, tomó como insumo los mapas generados por cada parámetro: Precipitación, tipo de suelo, cobertura, pendiente. Finalmente, se ejecutó el algoritmo, haciendo una intercepción de los datos compilados con las reglas predefinidas y se obtuvieron los mapas de susceptibilidad presentados en las figuras 21 y 22.

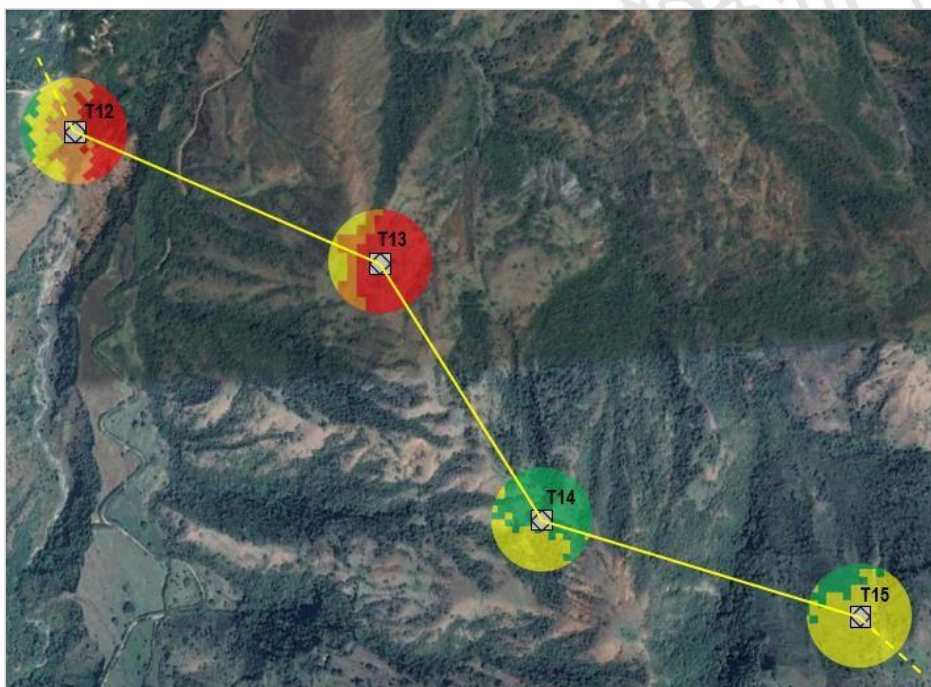


Figura 21. Mapa de susceptibilidad, categorización por píxel. Fuente: (Elaboración propia).

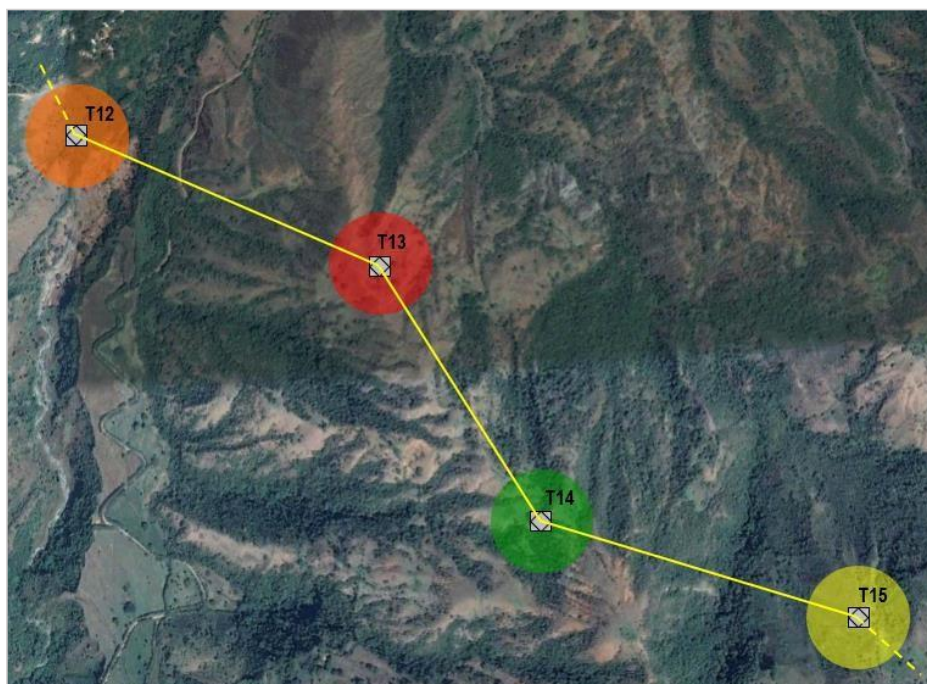


Figura 22. Mapa de susceptibilidad, categorización por área. Fuente: (Elaboración propia).

Reporte y documentación de avances en el desarrollo metodológico del sistema de alertas tempranas de deslizamientos: En las reuniones programadas, se fueron presentando los avances de cada actividad estipulada en la metodología del proyecto, así como se socializaron las dudas y aclaraciones concernientes al modelo, con el fin de que toda la Dirección de Mantenimiento estuviera al tanto del proyecto que se estaba ejecutando y generar sinergias con los demás proyectos de los cuales se podía extraer o compartir cualquier tipo de información. Estas reuniones se dividieron en dos categorías: Las primeras correspondieron a reuniones con los coordinadores del proyecto con una frecuencia de tres veces por mes y consistieron en sesiones donde se realizaba un trabajo colaborativo en cuanto a la investigación y definición de variables, así como la toma de decisiones sobre la puesta en marcha del proyecto. Por otra parte, los Grupos Primeros fueron otro tipo de reuniones donde asistía toda la Dirección de Mantenimiento con una frecuencia de una vez por mes, como se puede apreciar en la Figura 23, y básicamente se mostraban avances y resultados del proyecto de una manera más general.

Programación Grupos Primarios - Segundo Semestre de 2019	
Dirección de Mantenimiento	
Fecha	Actividad
25 de Julio	Presentación de proyectos y personal de la Dirección de Mantenimiento y equipo de gestión de Líneas de Transmisión
22 de Agosto	Primer Avance: Procesamiento y digitalización de información relacionada con estudio de suelos y diseño de cimentaciones
26 de Septiembre	Segundo Avance: Construcción de la Tabla de Suelos e investigación a cerca del sistema de alertas tempranas de deslizamientos
24 de Octubre	Tercer Avance: Construcción de la Tabla de Suelos y definición de variables para el sistema de alertas tempranas de deslizamientos
28 de Noviembre	Cuarto Avance: Estructuración del sistema de alertas tempranas de deslizamientos basado en un modelo de analítica predictiva e IA

Figura 23. Citación a los Grupos Primarios. Fuente: *(Elaboración propia)*.

Presentación final del modelo junto con el entregable solicitado: Por parte de la Gerencia de Operaciones, de la cual hace parte la Dirección de Mantenimiento, se realizó una reunión final donde se presentaron los proyectos de práctica académica correspondientes al segundo semestre del año en curso. Durante esta presentación, se expusieron los resultados y alcances del proyecto en mención, al igual que se justificó cada actividad realizada para el logro de los objetivos. Finalmente, se hizo entrega del artículo científico solicitado por el Director de Mantenimiento, en el cual se condensaba todo el desarrollo metodológico y la estructuración del sistema de alertas tempranas de deslizamientos, como consta en la figura 24:

Figura 24. Portada del informe entregado. Fuente: (Elaboración propia).



Conclusiones

Dentro de la gestión de activos en la Dirección de Mantenimiento, unos de los principales parámetros a analizar son la estabilidad y seguridad de los equipos, por lo que debe evaluarse la construcción de numerosas obras civiles para lograr tal fin y como es sabido, las obras civiles representan un elevado porcentaje dentro del presupuesto global de los proyectos de ingeniería. Sumado a esta problemática, en los últimos años, la Dirección de Mantenimiento ha venido ejecutando la gestión de los activos mediante una metodología correctiva, lo que se traduce en unos riesgos y costos más altos relacionados a las labores de mantenimiento de los activos. Gracias a la puesta en marcha de este proyecto, se consiguió modificar la forma de administrar los activos a través de una metodología prescriptiva y preventiva, lográndose unos riesgos y costos más bajos asociados a la vida útil de los equipos.

Las variables definidas en la metodología del proyecto, si bien son pocas, son las variables más frecuentes en los modelos de análisis de estabilidad de taludes y laderas, pues abarcan los parámetros que tienen la mayor participación en la ocurrencia de deslizamientos de tierra, no obstante, el sistema de alertas tempranas definido puede ser refinado a futuro con el fin de alcanzar unos resultados mucho más precisos y confiables. Asimismo, los mapas de susceptibilidad obtenidos en el modelo muestran en primera instancia una categorización de riesgo que, aunque es simple, es la única herramienta disponible para definir la ruta de acción en el marco de la gestión de activos y poder tomar las decisiones pertinentes.

El uso de técnicas de Inteligencia Artificial para tratar complejos problemas geotécnicos ha aumentado recientemente. Estas técnicas se han ido introduciendo en numerosas aplicaciones dentro del campo de la ingeniería civil, abarcando desde la automatización de procedimientos en la industria de la construcción, así como en los procesos de control y monitoreo de obras. De aquí la importancia de que el ingeniero conozca y domine dichas técnicas.

El alcance de este proyecto estuvo encaminado precisamente a la implementación de un modelo de Inteligencia Artificial para la solución de un problema de geotecnia: los deslizamientos en los sitios de torre. Como es sabido, el estudio de las ciencias de la tierra abarca un sinnúmero de parámetros, por lo que predecir el comportamiento de determinado terreno resulta ser muy complejo y los modelos tradicionales que se emplean para su estudio, arrojan resultados incongruentes con la realidad. Sin embargo, las técnicas de IA que se emplean hoy en día permiten que el estudio y modelación de problemas de ingeniería sean cada vez más exactos y precisos, ya que emplea métodos racionales y grandes volúmenes de información para recrear diversas situaciones y encontrar patrones, lo que permite tener un mayor control y conocimiento para la toma de decisiones en la solución del problema.

Con la ejecución de este proyecto se integraron los conocimientos previamente adquiridos sobre la mecánica de suelos con las nuevas metodologías basadas en la analítica predictiva y la inteligencia artificial, además de que se pudo emplear un banco extenso de información precedente como insumo para la estructuración de un

sistema pensante capaz de tomar decisiones basadas en variables cuantificables y en reglas asignadas por un grupo de expertos en ingeniería geotécnica.

Referencias Bibliográficas

- Albacete, A. (2011). *Procesamiento de datos LiDAR con ArcGIS Desktop 10*. Madrid, España.
- Allen, R. G. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Vol. 56). Food & Agriculture Organization.
- Barceló, M. (2001). *AI (Inteligencia artificial)*. Byte España, no 78, p. 98-99.
- Escudero, J. M., & López, J. M. E. (2008). *Manual de energía eólica/Guide to Wind Energy*. Mundi-Prensa Libros.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2019). Catálogo de datos abiertos, Subdirección de Agrología. Recuperado de: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2012). Catálogo de Mapas, Sistema de Información Ambiental de Colombia. Recuperado de: <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>
- Interconexión Eléctrica S.A E.S.P (2019). *La historia que nos une* [en línea]. Recuperado de: <http://www.isa.co/es/Paginas/default.aspx>
- Labegalini, P. R., Labegalini J. A., Fuchs, R. D. y De Almeida, M. T. (1992). *Projetos Mecânicos das linhas aéreas de transmissão*. São Paulo, Brazil : Edgar Blücher Ltda.
- Martínez, N. (2017, noviembre). "Qué es la tecnología LiDAR y por qué está vinculada con los vikingos o el coche autónomo" *Nobbot*. Recuperado de: <https://www.nobbot.com/futuro/tecnologia-lidar/+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co>.
- Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2010). *Título H - Estudios Geotécnicos*. [Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente] Bogotá D. C, Colombia.
- National Aeronautics and Space Administration (2019). Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, Earth Data. Recuperado de: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B42RT_7/summary.
- Ramos, A. M., Trujillo, M. G., y Prada, L. F. (2015). *Niveles umbrales de lluvia que generan deslizamientos: Una revisión crítica*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol. 25, no 2, p. 61-80.
- Salvá Martorelli, P. J. (2019). *Generalidades a cerca de los deslizamientos de tierra*. Estabilización de taludes. (Curso de Posgrado, Universidad EAFIT).
- Santacana Quintas, N. (2001). *Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de* Catalunya.
- Servicio Geológico Colombiano (2013). Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa. Bogotá D. C, Colombia.
- Sistema de Información Geográfica para la planeación y el Ordenamiento Territorial Nacional (2019). Explorador de Capas: Datos espaciales. Recuperado de: <http://sigotvg.igac.gov.co:8080/>
- Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas*

Editorial Universidad Industrial de Santander, UIS, pp. 03-03.

- Wiczorek, G. F. (1996). *Landslide triggering mechanisms*. Landslides: Investigation and Mitigation, pp. 76-90.