



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## **Análisis del contenido de agua en el suelo a escala regional y su efecto en la estabilidad de taludes.**

Trabajo realizado por:

**Ariel Alberto Contreras Becerra**

Dirigido por:

**Marcel Hürlimann**

**Marc Berenguer**

Máster en:

**Ingeniería del Terreno**

Barcelona, 29 de junio de 2022

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**

## ABSTRACT

The present work presents the possibility of using moisture content data through a hydrological model, in 3 areas of Catalonia, from the year 2019, which are an experimental slope in Agropolis UPC, a slope in Cercs (Pre-Pyrenees Oriental) and a slope in Senet of Barrabes (Central Pyrenees).

The European Flood Awareness System (EFAS) makes flood forecasts from the initial soil moisture produced by the LISFLOOD model, which is based on temperature and wind observations near the surface. In the first part of this research, we compare the moisture contents recorded by field observations with the moisture content simulations by LISFLOOD, to analyze the similarities or differences and the potential of LISFLOOD simulations for their usefulness in areas where no field observations are available.

A Pearson correlation was performed between the data observed in the field and the model simulations, where the degree of association maintained by the data can be analyzed. With them, it is possible to deduce the high linear relationship that the data present and, in this way, determine its validity.

The comparison results show that the LISFLOOD model works well when there are precipitations that cause an increase in the moisture content in the terrain, with the exception that the simulations present a higher moisture content due to the type of terrain present, than what was captured, from field observations.

The second part presents the results of the comparative of the use of moisture content by field observations and the simulated by the LISFLOOD model for a stability analysis using the infinite slope method. Of these 3 study areas for this part, only the 2 slopes were chosen, which are active and can cause landslides. As preliminary results, it can be indicated that both are in a stable state. In the same way a Pearson correlation between the stability results, to observe the degree of association and differences, that the results have through field observations and LISFLOOD simulations.

## RESUMEN

En el presente trabajo se presenta la posibilidad de utilizar datos de contenido de humedad mediante un modelo hidrológico, en 3 zonas de Cataluña, del año 2019, las cuales son un talud experimental en Agropolis UPC, una ladera en Cercs (Pre-Pirineo Oriental) y una ladera en Senet de Barrabés (Pirineo Central).

El Sistema Europeo de Alerta de Inundaciones (EFAS), realiza pronósticos de inundaciones a partir de la humedad inicial del suelo, producida por el modelo LISFLOOD, que se basa en observaciones de temperatura y viento cerca de la superficie.

En la primera parte de esta investigación, comparamos los contenidos de humedad que registran las observaciones de campo, con las simulaciones de contenido de humedad por LISFLOOD, con el propósito de analizar las similitudes o diferencias y el potencial de las simulaciones de LISFLOOD, para su utilidad en zonas donde no se cuenta con observaciones de campo.

Se realizó una correlación de Pearson, entre los datos observados de campo y las simulaciones del modelo, donde se puede analizar el grado de asociación que mantienen los datos. Con ellos, se puede deducir la alta o baja relación lineal que presentan los datos y de esta manera determinar su validez.

Los resultados de comparación muestran que el modelo LISFLOOD funciona bien al momento de existir precipitaciones que ocasionan el aumento del contenido de humedad en el terreno, con excepción de que las simulaciones presentan un contenido de humedad mayor por el tipo de terreno presente, a lo captado por las observaciones de campo.

En la segunda parte, se presentan los resultados de la comparativa del uso del contenido de humedad por las observaciones de campo y lo simulado por el modelo LISFLOOD para un análisis de estabilidad, mediante el método de talud infinito. De estas 3 zonas de estudio para esta parte, sólo se escogieron las 2 laderas en las que se puedan producir deslizamientos. Como resultados preliminares, se puede indicar que ambas se encuentran en un estado estable. También se realizó una correlación de Pearson, entre los resultados de estabilidad, para observar el grado de asociación y las diferencias que tienen los resultados, mediante las observaciones de campo y las simulaciones por LISFLOOD.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios, por la salud otorgada durante este tiempo.

A mis padres y mis hermanos por el apoyo que siempre me brindan, sin importar las circunstancias.

A mis tutores Marcel Hürlimann y Marc Berenguer por la oportunidad, conocimiento, el seguimiento y la enorme paciencia que me han brindado.

A mis 15 compañeros/familia UPC, principalmente (Jhon Carreño, Abercio Cañas, Karina Campiño, Julio Campos, Rogelio Núñez y Aníbal Moncada) por su apoyo y gran sentido de compañerismo durante mi estadía en Barcelona, Cataluña.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Estructura del Documento	3
<b>2</b>	<b>DESCRIPCION DE LAS ZONAS DE ESTUDIO</b>	<b>4</b>
2.1	Parc Agropolis UPC	5
2.1.1	Mediciones de Campo	6
2.1.2	Infiltración	7
2.1.3	Curva de Retención	7
2.2	Cercs (Pre- Pirineo Oriental)	8
2.2.1	Estación METEO	9
2.2.2	Estación SLOPE	9
2.3	Senet (Pirineo Central)	10
2.3.1	Trabajos Realizados	11
<b>3</b>	<b>MODELO LISFLOOD</b>	<b>12</b>
3.1	Descripción del Modelo	13
3.2	Evapotranspiración	14
3.3	Humedad del suelo	15
3.4	Mapas de entrada en el Modelo	17
3.5	Procesos para el cálculo de la humedad	19
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>23</b>
5.1	Parc Agropolis UPC.	23
5.1.1	Análisis del contenido de humedad	23
5.2	Cercs (Pre- Pirineo Oriental)	31
5.2.1	Análisis del contenido de humedad	31
5.3	Senet (Pirineo Central)	36
5.3.1	Análisis del contenido de humedad	36
<b>6</b>	<b>ANALISIS DE ESTABILIDAD</b>	<b>41</b>
6.1	Introducción	41
6.2	Método de equilibrio limite	42
6.3	Talud infinito	43

<b>6.4</b>	<b>Cálculo de Factor de Seguridad</b> .....	45
6.4.1	Factor de Seguridad en Cercs .....	47
6.4.2	Factor de Seguridad en Senet.....	52
<b>7</b>	<b>Conclusión y líneas de futuro trabajo</b> .....	56
7.1	Conclusión .....	56
7.2	Líneas de trabajo futuro .....	58
<b>REFERENCIAS</b> .....		59
Anexo 1 La succión, a partir de la ecuación curva de retención, para determinar la tensión de succión. .....		61
Anexo 2 Equilibrio de fuerzas para determinar la ecuación de Coeficiente de seguridad mediante el método de talud infinito. ....		63

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Localización de las 3 zonas de estudio. A) Senet, B) Cercs, C) Agropolis UPC.....	4
Figura 2.2 Ubicación del Terraplén Parc Agropolis UPC. (Extraído de Google Earth). .....	5
Figura 2.3 Ubicación de los instrumentos y características del terraplén (Guachizaca, 2018).....	6
Figura 2.4 Vista de planta del Municipio de Cercs (Extraído de Google Earth). .....	8
<i>Figura 2.5 Ubicación del Barranco de Rebaixader y Población de Senet de Barrabés (Extraída de Google Earth). .....</i>	<i>10</i>
Figura 3.1 Parámetros que conforman el modelo LISFLOOD (Roo et al., 2012). .....	12
Figura 3.2 Estructura general del modelo LISFLOOD (Roo et al., 2013).....	13
Figura 3.3 El área verde oscura se le considera (fracción boscosa), las columnas rojas (fracción de escorrentía directa), el color azul define cuerpos de aguas abiertas (fracción de agua) y el verde claro (fracción otros) (Roo et al., 2013). .....	14
Figura 3.4 Cálculo de la evapotranspiración total del pixel mediante sus fracciones (Roo et al., 2013). .....	15
Figura 3.5 Inicialización del Modelo LISFLOOD para las variables de estado (Roo et al., 2013).....	18
Figura 5.1 Contenido Volumétrico de Agua del Talud Norte y Sur No Vegetado .....	24
Figura 5.2 Contenido Volumétrico de Agua del Talud Norte y Sur Vegetado.....	24
Figura 5.3 Simulaciones del contenido de humedad en la zona por EFAS en tres (3) niveles. ....	25
Figura 5.4 Nivel 1 simulado por el modelo LISFLOOD y datos observados en campo para las orientaciones NnV y SnV. ....	26
Figura 5.5 Nivel 1 simulado por el modelo LISFLOOD y datos observados en campo para las orientaciones NV y SV. ....	27
Figura 5.6 Nivel 2 simulado por el modelo LISFLOOD y datos observados en campo para las orientaciones NnV y SnV. ....	27
Figura 5.7 Nivel 2 simulado por el modelo LISFLOOD y datos observados en campo para las orientaciones NV y SV. ....	28
Figura 5.8 Gráfico de correlación entre los contenidos de humedad VWC de LISFLOOD y el sensor a 16 cm de profundidad con orientación Norte no Vegetado. a) Nivel 1 de LISFLOOD con grado de asociación del 26%. b) Nivel 2 de LISFLOOD con grado de asociación del 65%.....	29
Figura 5.9 Gráfico de correlación entre los contenidos de humedad VWC de LISFLOOD y el sensor a 16 cm de profundidad con orientación Sur no Vegetado. a) Nivel 1 de LISFLOOD con grado de asociación del 9%. b) Nivel 2 de LISFLOOD con grado de asociación del 29%.....	30
Figura 5.10 Contenido Volumétrico de Agua observadas en campo “In Situ” a tres (3) profundidades 11, 23 y 36 cm. ....	31
Figura 5.11 Simulaciones del contenido de humedad en la zona por EFAS en tres (3) niveles. ....	32
Figura 5.12 Nivel 1 simulado por el modelo Lisflood y datos observados en campo. ....	32

Figura 5.13 Nivel 2 simulado por el modelo LISFLOOD y datos observados en campo. ....	33
Figura 5.14 Gráfico de correlación entre los contenidos de humedad VWC de LISFLOOD y el sensor a 11 cm de profundidad. a) Nivel 1 de LISFLOOD con grado de asociación del 10%. b) Nivel 2 de LISFLOOD con grado de asociación del 78%. ....	34
Figura 5.15 Gráfico de correlación entre los contenidos de humedad VWC de LISFLOOD y el sensor a 23 cm de profundidad. a) Nivel 1 de LISFLOOD con grado de asociación del 2% prácticamente nula. b) Nivel 2 de LISFLOOD con grado de asociación del 81%. ....	35
Figura 5.16 Contenido Volumétrico de Agua observadas en campo “In Situ” a tres (4) profundidades 5, 15, 30 y 50 cm. ....	36
Figura 5.17 Simulaciones del contenido de humedad en la zona por EFAS en tres (3) niveles. ....	37
Figura 5.18 Nivel 1 simulado por el modelo LISFLOOD y datos observados en campo a cuatro (4) profundidades. ....	37
Figura 5.19 Nivel 2 simulado por el modelo LISFLOOD y datos observados en campo. ....	38
Figura 5.20 Gráfico de correlación entre los contenidos de humedad VWC de LISFLOOD y el sensor a 15 cm de profundidad. a) Nivel 1 de LISFLOOD con grado de asociación débil del 32%. b) Nivel 2 de LISFLOOD con grado de asociación del 91%. ....	39
Figura 6.1 Rotura en un Talud “Infinito” (González de Vallejo et al., 2002) ....	43
Figura 6.2 Método del Talud infinito.....	46
Figura 6.3 Profundidad y orden geológica de los materiales en Cercs (Mamani, 2019) ....	48
Figura 6.4 Evolución del Factor de seguridad según el sensor a) 11cm de profundidad b) 23cm de profundidad y c) 36cm de profundidad. ....	49
Figura 6.5 Variación de Factor de Seguridad diario por el nivel 1 de LISFLOOD para el periodo de mayo a octubre 2019. ....	50
Figura 6.6 Variación de Factor de Seguridad diario por LISFLOOD del nivel 2.....	50
Figura 6.7 Evolución del Factor de seguridad en Senet. a) 5cm de profundidad b) 15 cm de profundidad y c) 30 cm de profundidad. ....	53
Figura 6.8 Evolución del factor de seguridad en Senet por el modelo LISFLOOD. a) Factor de seguridad Nivel 1. b) Factor de seguridad nivel 2. ....	55



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Correlación entre datos simulados por LISFLOOD y datos observados en campo Agropolis UPC. ....	28
Tabla 2: Correlación entre datos simulados por LISFLOOD y datos observados en campo en Cercs. ....	33
Tabla 3: Correlación entre datos simulados por LISFLOOD y datos observados en campo en Senet. ....	38
Tabla 4: Parámetros de los materiales para la curva de retención y parámetros resistentes del terreno. ....	47
Tabla 5: Factor de Seguridad de la ladera de Cercs. ....	51
Tabla 6: Correlación de Pearson de los factores de seguridad entre sensores y LISFLOOD en Cercs. ....	51
Tabla 7: Parámetros de los materiales para la curva de retención y parámetros resistentes del terreno. ....	52
Tabla 8: Factores de seguridad de la ladera de Senet.....	54
Tabla 9: Correlación de Pearson de los factores de seguridad entre sensores y LISFLOOD en Senet. ....	54

# 1 INTRODUCCION

## 1.1 Antecedentes

La estabilidad de los taludes depende de factores geométricos, factores geológicos, factores hidrogeológicos y factores geotécnicos. En los suelos, la litología, estratigrafía y las condiciones hidrogeológicas, determinan las propiedades resistentes y el comportamiento del talud (González de Vallejo et al., 2002). Los parámetros como la precipitación, vegetación, temperatura y evaporación de diversas regiones determinan la cantidad de humedad almacenada, de gran importancia en el terreno, ya que ellos ocasionan los deslizamientos.

La precipitación es una de las principales protagonistas en roturas de laderas superficiales, debido a que la filtración de agua en el terreno genera presiones intersticiales, erosión del material presente en los taludes y aumento en el peso del material por saturación.

El agua en el terreno es uno de los mayores oponentes, ya que reduce la estabilidad de los taludes al disminuir su resistencia y aumentar fuerzas tendentes a la inestabilidad (González de Vallejo et al., 2002). La erosión es el resultado de los daños y fallas de la estructura del terreno que afecta a la estabilidad de laderas (Tang et al., 2018). Se han hecho Distintos estudios de la erosión en pendientes diseñadas presentadas (De Oña et al., 2011), (Osiński & Koda, 2016) y un estudio de la vegetación en laderas para incluir en el análisis de estabilidad por (Askarinejad et al., (2012).

Existen diversas posibilidades para evitar erosiones en laderas desnudas. Algunas se basan en el uso de vegetación en la superficie de la pendiente, como alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Es indiscutible la importancia de la vegetación para mejorar la infiltración por parte de las precipitaciones y cómo afecta esto en la disminución de la escorrentía. Ya que la transpiración de las plantas induce mayor succión y, por tanto, la estabilidad de la pendiente (Gray y Sotir, 1996). La erosión de los taludes está relacionada con las propiedades del flujo de agua superficial, condiciones hidrológicas de la superficie, la textura del suelo y la cobertura de la pendiente (Zhao et al., 2019).

En la hidrología del terreno, el principal integrante es la humedad del suelo, ya que es fundamental para dar respuestas al entorno físico. El conocimiento de la distribución y vinculación de la humedad del suelo a la evaporación y la transpiración es esencial para predecir la influencia de los procesos de la superficie terrestre.

Predecir las variaciones de la humedad del suelo, el cambio climático y pronósticos meteorológicos, determinarán cambios en la temperatura de la superficie, sequías e

inundaciones. La humedad del suelo se puede expresar en diferentes unidades, por lo general como contenido volumétrico de agua en el suelo (VWC), expresada como la profundidad de una columna de agua, contenida en una profundidad determinada del suelo. La medición del contenido de agua en el terreno se realiza mediante distintas técnicas de las que se obtienen un conjunto de datos que dependen de su aplicación y recursos disponibles.

La principal motivación de un conjunto de datos de observaciones de mediciones in situ, lo cuales son fundamentales para diversos análisis climatológicos, es la de evaluar datos de humedad del suelo, simuladas por modelos que permitan validar su difusión y utilizarlos como observaciones genuinas.

Con ese fin se ha recopilado, divulgado y analizado, los datos de humedad del suelo de todo el mundo, en un sitio web donde se tiene la humedad global del suelo (ISMN, 2022).

En este banco de datos, se encuentra una combinación del proyecto Mundial de intercambios de Energía y Agua (GEWEX), el Comité de Satélites de Observación de la Superficie Terrestre (CEOS); el Sistema Mundial de observación del Clima – Panel de observación Terrestre para el clima (GCOS-TOPC), el grupo de Observación de la superficie terrestre (GEO) y La Red Terrestre Mundial de Hidrología (GTN-H); todo esto ha sido posible gracias al apoyo financiero del programa de Observación de la superficie terrestre de la Agencia Espacial Europea (ESA) y las distintas contribuciones voluntarias de científicos y redes del planeta. Actualmente tienen observaciones de humedad del suelo para más de 600 estaciones de una gran variedad de climas globales, incluida la ex Unión Soviética, China, Mongolia, India y Estados Unidos, donde la mayoría de estos datos han sido llevados a cabo por observaciones gravimétricas “in situ” de la humedad del suelo, que cuentan con vegetación de pasto y algunas son agrícolas (Robock et al., 2000).

La motivación del presente Trabajo de Fin de Máster (TFM), es la de comparar los datos de contenido de humedad del suelo mediante el modelo hidrológico LISFLOOD, el cual es desarrollado por el Grupo de Inundaciones del “Joint Research Centre” (JRC) de la Comisión Europea y los datos de contenido de humedad, obtenidos mediante observaciones “in situ” en tres (3) zonas de Cataluña, a saber: un terraplén diseñado (Oorthuis Gómez, 2016) en el Parc UPC Agropolis, en el delta del Llobregat, provincia de Barcelona, una ladera ubicada en el Municipio de Cercs, perteneciente a la comarca de Berguedá, Cataluña y el barranco de Rebaixader, ubicado cerca de la población de Senet de Barrabés, con el fin de validar y reemplazar los datos observados en campo con los datos del modelo.

El modelo LISFLOOD se aplica sobre toda Europa y simula el contenido de humedad en el suelo a través de satélites y validar sus simulaciones es de gran utilidad ya que no se cuenta con observaciones in situ en todas partes.

## 1.2 Objetivos

El objetivo del presente trabajo es el análisis de la viabilidad de utilizar las simulaciones de humedad de LISFLOOD, para sustituir los datos en campo y de esta manera validarlos y darle una utilidad a ciertas zonas donde no contamos con observaciones de campo.

El principal objetivo del presente trabajo es realizar una relación comparativa entre datos obtenidos por observación "In Situ" con los datos simulados por el Modelo LISFLOOD el cual es utilizado por el Sistema de Pronóstico de Inundaciones de Europa (EFAS) y mediante estos datos, evaluar ciertos problemas asociados, como los son los deslizamientos producidos por erosión o inestabilidad.

De estos se desarrollan:

- Análisis de datos obtenidos por sensores "In Situ".
- Análisis de datos simulados por el Modelo LISFLOOD.
- Análisis preliminar de estabilidad mediante el método de un talud infinito.

## 1.3 Estructura del Documento

El presente documento de TFM se ha dividido en 7 capítulos descritos a continuación:

El primer capítulo, contiene la introducción, antecedentes y objetivos.

En el segundo capítulo, presentamos las descripciones de las 3 zonas de estudio describiendo su ubicación, antecedentes y sus análisis de datos obtenidos "In Situ".

En el tercer capítulo, se desarrolla la descripción general del Modelo LISFLOOD.

En el cuarto capítulo, se describe la metodología utilizada en la comparativa entre datos observados en campo, con los datos simulados por el modelo y el análisis de estabilidad.

En el quinto capítulo, se presenta los resultados comparativos, entre los contenidos de humedad obtenido por las observaciones en campo y el contenido de humedad simulado por el modelo LISFLOOD.

En el sexto capítulo, cálculos preliminares de estabilidad mediante el método de talud infinito utilizando característica del material y parámetros resistentes de 2 zonas de estudios con los contenido humedad por los sensores y lo simulado por LISFLOOD.

Y finalmente un séptimo capítulo, donde se presentan las conclusiones y líneas de trabajo futuras.

## 2 DESCRIPCION DE LAS ZONAS DE ESTUDIO

En el presente capítulo se describen las zonas de estudio, localizadas en el territorio catalán tal como se muestra en la figura 2.1; estos son: el Parc Agropolis UPC, el cual es una unidad científico-técnica inaugurada el 18 de octubre de 2010, especializada en los ámbitos de la ingeniería agroalimentaria, la ingeniería biotecnológica y la ingeniería del medio ambiente y del paisaje, que presta servicio a grupos de investigación de la UPC, así como empresas y otras instituciones externas.

Luego tenemos a Cercs (Pre-Pirineo Oriental), ubicada en la población de Sant Jordi de la comarca de Berguedá, provincia de Barcelona, a la que se puede acceder por vía terrestre desde la ciudad de Barcelona (Mamani, 2019).

Y, por último, tenemos a Senet de Barrabés (Pirineo Central), una entidad local ubicada al Noreste de la península Ibérica en el Municipio de Vilaller, comarca de alta Ribagorza, provincia de Lérida (Cataluña, España), que se encuentra a una altura media de 1340 msnm. El área de estudio se encuentra entre Senet de Barrabés y Aneto, que se puede acceder mediante un camino rural asfaltado con la carretera nación N-230 (Serna, 2019).

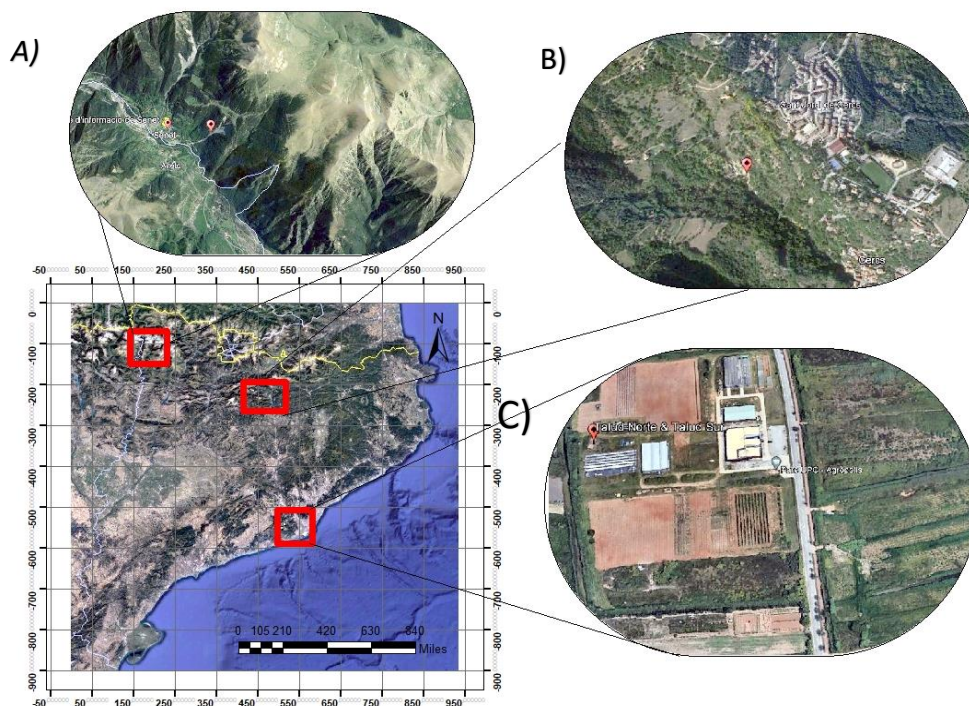


Figura 2.1 Localización de las 3 zonas de estudio. A) Senet, B) Cercs, C) Agropolis UPC.

## 2.1 Parc Agropolis UPC

En el Parc UPC Agropolis a ( $41^{\circ}17'018''$  N  $2^{\circ}02'035''$  E), se construyó un terraplén experimental a finales de 2016, situado a 20 km al suroeste de Barcelona, España, en la figura 2.2 (punto rojo), se presenta el terraplén desde una vista de planta.

El terraplén tiene 18 m de largo, 12 m de ancho, 2,5 m de alto y tiene pendientes 3H: 2V (34 grados); consta de cuatro partes instrumentadas con diferentes orientaciones de pendiente y comprende: Norte sin vegetación (NnV), Norte con vegetación (NV), Sur sin vegetación (SnV) y Sur con vegetación (SV).

En cada parte, las variables termo hidráulicas se monitorean dentro de una capa de suelo poco profunda de 50 a 70 cm de espesor, envuelta en un polietileno impermeable con geomembrana, para evitar la transferencia de agua con otras partes. El suelo utilizado es arena limosa con gran parte de partículas de grano grueso.

La configuración, las propiedades del suelo y las pruebas de laboratorio se pueden encontrar en (Oorthuis et al., 2018).

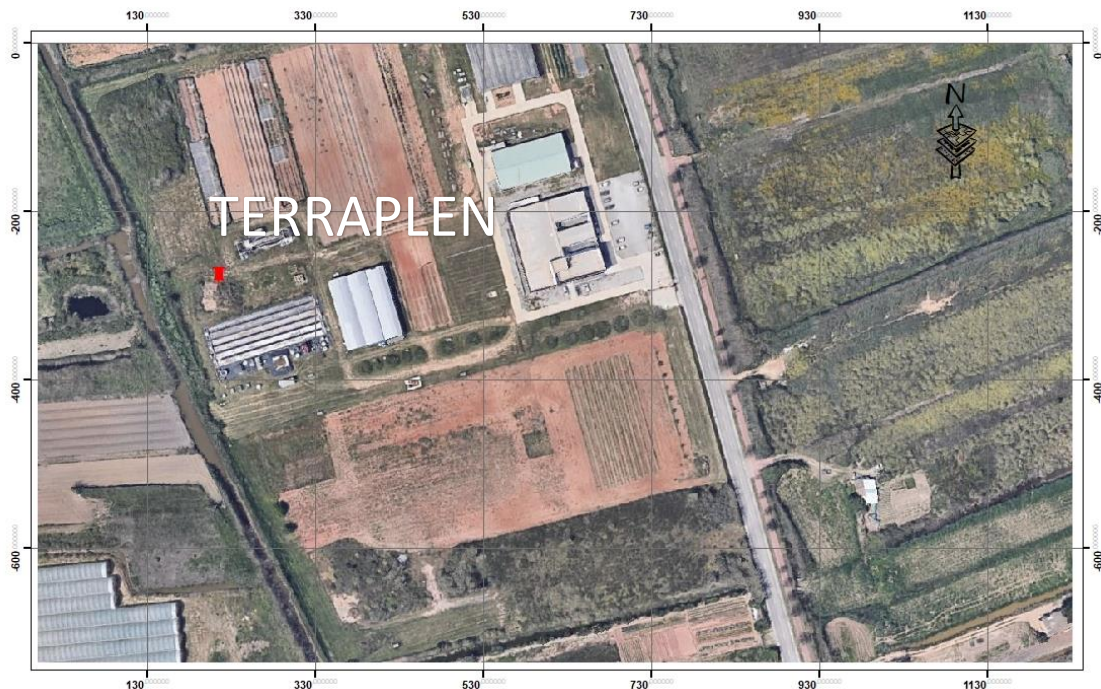


Figura 2.2 Ubicación del Terraplén Parc Agropolis UPC. (Extraído de Google Earth).



En la figura 2.3 muestra su emplazamiento en el terraplén en relación a los sensores de humedad (círculos celestes), que miden el contenido de humedad en el suelo (VWC) y las dimensiones en planta del terraplén experimental para el área no vegetada se presentan como perfil B-B y el área vegetada como perfil C-C.

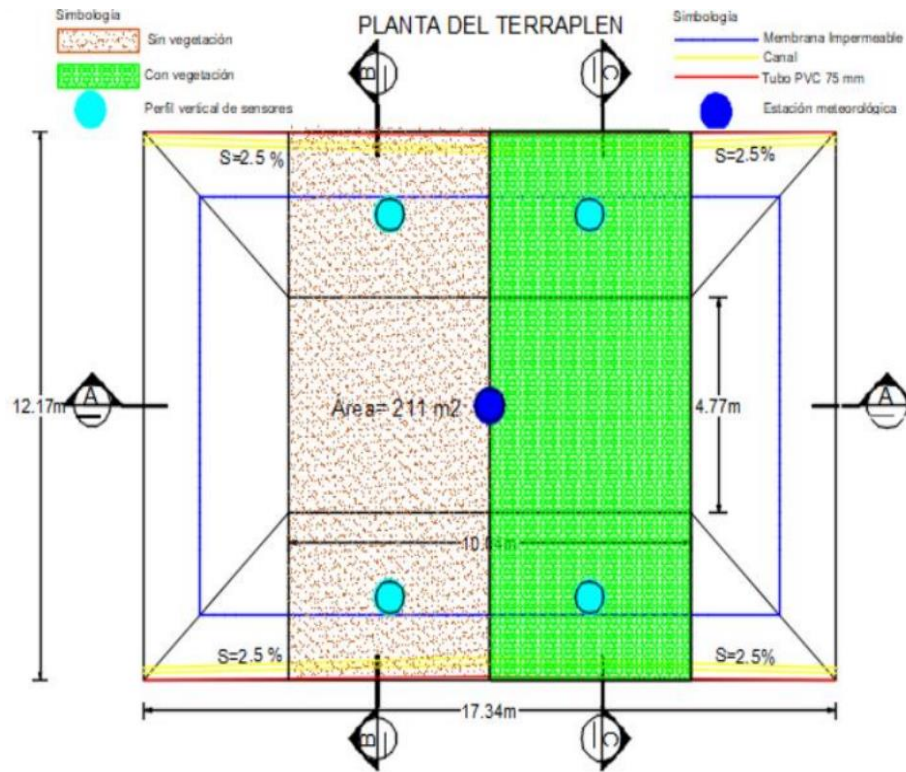


Figura 2.3 Ubicación de los instrumentos y características del terraplén (Guachizaca, 2018).

### 2.1.1 Mediciones de Campo

Los datos de precipitación en el terraplén se han obtenidos con el pluviómetro (modelo ECRN-100 high-resolution rain gauge, METER) de la estación meteorológica existente (METEO).

### **2.1.2 Infiltración**

La infiltración en el terraplén está definida por la cantidad de volumen de agua que entra en el terreno y se almacena en ella dependiendo de la porosidad que tiene el suelo, en este caso, el terraplén tiene dos (2) características específicas que modifican este parámetro, una de sus laderas contiene vegetación y la otra es suelo desnudo; se diseñó de esta manera con el fin de analizar conductividades hidráulicas, contenido de humedad, temperatura y sus variaciones.

### **2.1.3 Curva de Retención**

La curva de retención representa la relación existente entre la succión y la cantidad de agua que tiene el suelo. Sirve para caracterizar, entender y predecir el comportamiento de la relación flujo de agua (contenido de humedad) en suelos no saturados.

Por otra parte, la succión está relacionada con la cohesión aparente, se dice resistencia aparente, ya que ésta se anula cuando el material se encuentre en estado de saturación. La interacción del fluido con el suelo se rige por la capilaridad del material y capacidad de absorción, que a su vez depende con mayor importancia de la composición química del suelo, temperatura y su fluido (Romero et al., 2011).



## 2.2 Cercs (Pre- Pirineo Oriental)

En el Municipio de Cercs, de la comarca Berguedá, Cataluña, se registran datos de precipitación mediante un pluviómetro en la estación METEO, los datos del comportamiento de las laderas, su desplazamiento, la succión en el suelo y el contenido de humedad del terreno, son determinados por la estación SLOPE.

En la Figura 2.4 se presenta el Municipio y la ubicación de la zona de estudio donde se han presentado deslizamientos, ocasionados por la presencia de agua en el terreno, lo cual produce una reducción en la resistencia del material.

Esta zona está compuesta por un coluvión con suelo arcilloso, que se encuentra sobre una capa de argilitas fracturadas y alteradas, (estrato donde se ubica la superficie de deslizamiento) y seguido otra capa de argilitas inalteradas.

En esta zona de estudio se han ubicado tres (3) sensores para registrar los contenidos de humedad a una profundidad de 11cm, 23cm y 36 cm. Igualmente se registran las temperaturas del suelo por los sensores de succión y el piezómetro.



Figura 2.4 Vista de planta del Municipio de Cercs (Extraído de Google Earth).

### **2.2.1 Estación METEO**

La estación METEO es una estación meteorológica que cuenta con herramientas necesarias para registrar datos en la zona, como el pluviómetro Decagon ECRN-100, un sensor sensible que se describe en (High Resolution Rain Gauge Manual); Campbell Scientific HC2S3, sensor capaz de medir la temperatura y humedad del aire (HC2S3 Temperature and Relative Humidity Instruction Manual) y el Barómetro (BMP085 BOSCH) que almacena datos de presión atmosféricas de la zona, para medidas de presión de agua.

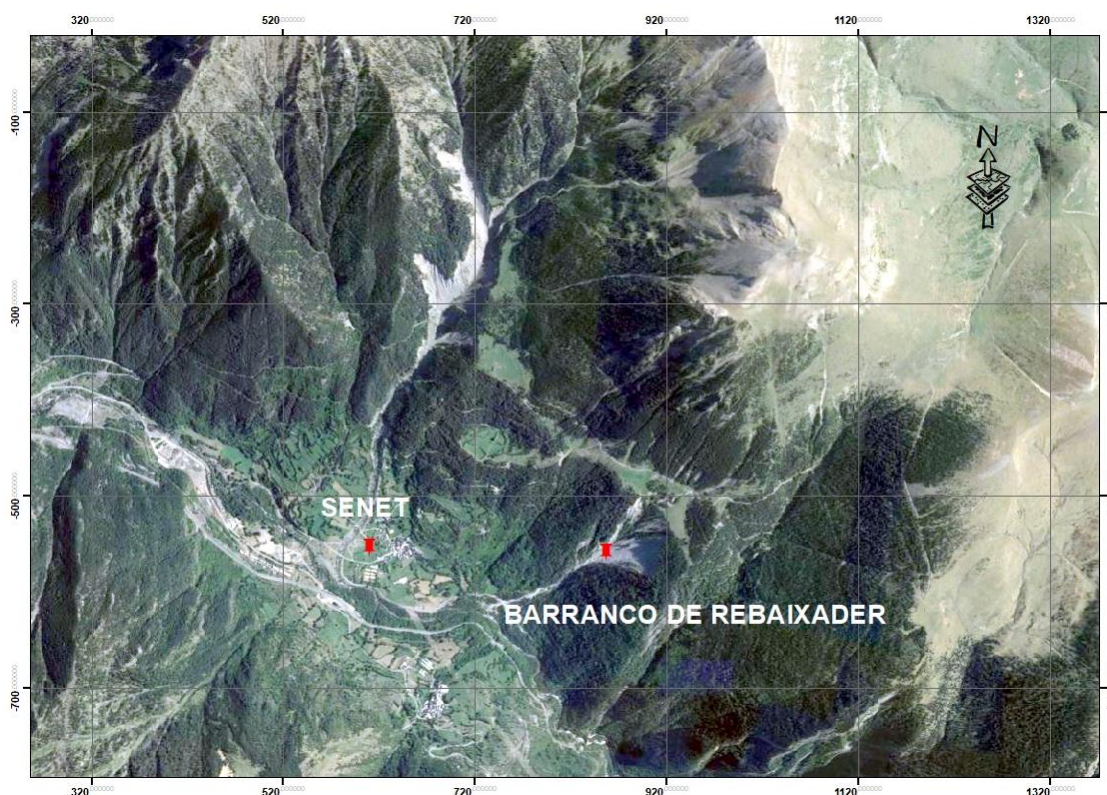
### **2.2.2 Estación SLOPE**

La estación SLOPE está ubicada en la ladera del deslizamiento y contiene Instrumentos para medir parámetros como la succión a través de (Decagon MPS-2), el contenido de humedad por (Decagon 10HS), presiones de agua y la temperatura del suelo por piezómetro (Geosense WP-3200) y desplazamientos en la superficie de la ladera por (ASM WS12-3000).

### 2.3 Senet (Pirineo Central)

El Barranco de Rebaixader, localizado en la población de Senet de Barrabés, Comarca de la Alta Ribagorza, provincia de Lérida (Cataluña, España) en el pirineo central, es una de las laderas inestables con desprendimiento de rocas y flujos de derrubios. La erosión se produce ya que se ubica sobre un material antiguo de morrena.

En la Figura 2.5 se presenta la ubicación de la población y la ubicación de la zona de estudio en los cuales se desean obtener datos de contenido volumétrico de humedad.



*Figura 2.5 Ubicación del Barranco de Rebaixader y Población de Senet de Barrabés (Extraída de Google Earth).*

La geología de la zona donde afloran rocas ígneas y metamórficas involucra materiales en una escala temporal fanerozoico (Serna, 2019).

### **2.3.1 Trabajos Realizados**

Debido a las intensas precipitaciones en la zona y ciertos deshielos en épocas de primavera, el terreno presenta efectos importantes para la población de Senet como flujos de derrubios en el barranco.

El flujo de derrubio ocurrido en el año 1963 erosionó el pie del barranco, depositando material a medida que se avanzaba; al final del barranco se interceptó el Río Noguera Ribagorzana y se formó una presa natural que detenía las aguas del río, luego de cierto tiempo, la presa dio paso a una fuerte cantidad de agua abajo, dejando capas de sedimentos por encima de la vegetación (Bolaño, 2008).

Por las características geomorfológicas de la zona, se realizaron diversos estudios con el propósito de prevenir riesgos geológicos, estimación de procesos torrenciales y corrientes de derrubios, a través de monitorización (Abanco et al., 2011) para determinar qué cantidad de volumen es transportado.

En el 2012, debido a las grandes precipitaciones, se realizaron monitoreos para determinar la humedad y presiones intersticiales en un till de Senet (Madrid, 2012).

La zona de estudio tiene instalada en el mismo canal del barranco, estaciones meteorológicas, una estación de flujo, para analizar el comportamiento de las corrientes y una estación de sensores que controlan la infiltración de la zona (Abanco et al., 2011).



### 3 MODELO LISFLOOD

El modelo LISFLOOD es utilizado por EFAS para simular aplicaciones de diversos eventos que ocurren en nuestro entorno habitual. Una de sus simulaciones es la humedad del terreno, que necesitamos para realizar nuestra comparación con los datos medidos in situ, debido a esto, en este capítulo se describe un concepto general del modelo hidrológico, cómo funciona y su proceso para realizar el cálculo de la humedad del terreno.

LISFLOOD es un modelo hidrológico de lluvia-escorrentía que es capaz de simular los procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca (Roo et al., 2013). Está desarrollado por el Grupo de Inundaciones del Proyecto de Riesgos Naturales del “Joint Research Centre” (JRC) de la Comisión Europea.

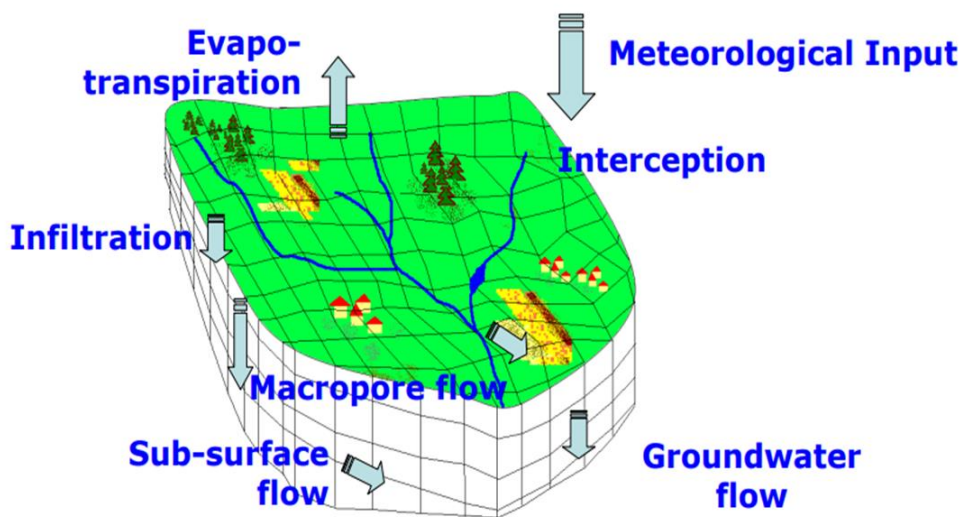


Figura 3.1 Parámetros que conforman el modelo LISFLOOD (Roo et al., 2012).

El Objetivo principal del modelo es tener una herramienta que se pueda utilizar para captar diversas aplicaciones en un (1) solo modelo, ya que existen modelos que se encargan de ejecutar cada una de sus funciones de manera individual.

- Prevenir Inundaciones.
- Evaluar los efectos de las medidas de regulación fluvial.
- Evaluar los efectos del cambio de usos de suelo.
- Evaluar los efectos producidos por los agentes atmosféricos.

El modelo LISFLOOD es un modelo ambiental que está basado en los Sistema de Información Geográfica (GIS), en donde el usuario controla las entradas y salidas del modelo.

En la Figura 3.1 se observan las variables de entrada y salida que conforman el balance hídrico que se producen en el modelo, de tal manera que la Figura 3.2 presenta la estructura general más detallada del modelo LISFLOOD.

### 3.1 Descripción del Modelo

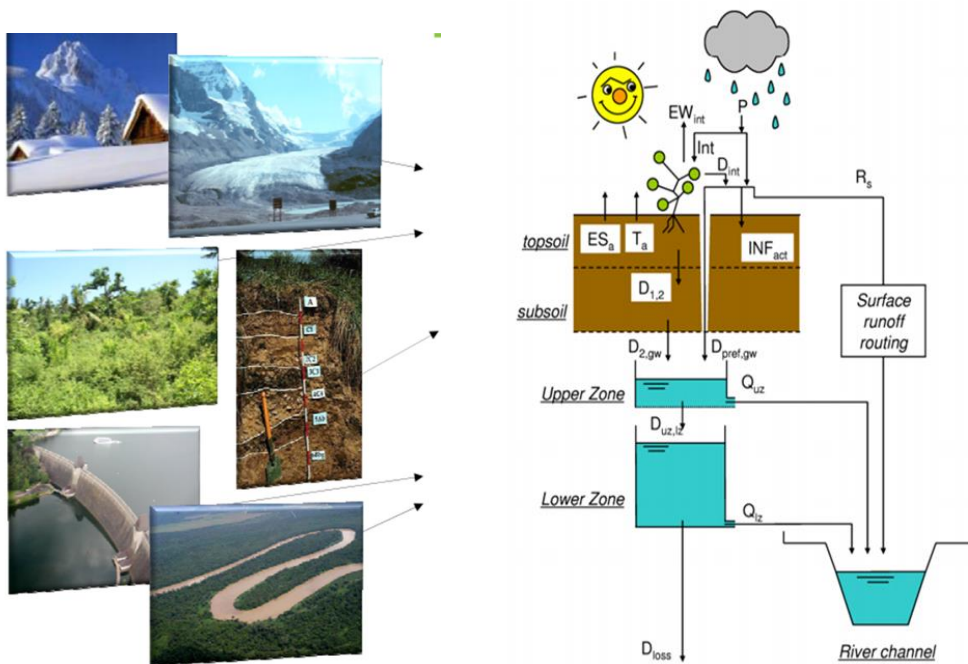


Figura 3.2 Estructura general del modelo LISFLOOD (Roo et al., 2013).

En la Figura 3.2 se observa la estructura general del Modelo LISFLOOD, el cual realiza un balance hídrico con los siguientes componentes:

- Un submodelo de equilibrio hídrico de las 2 capas de suelo.
- Submodelo para la simulación de agua y flujo subterráneos.
- Un submodelo para la escorrentía superficial hasta el cauce del río.

El modelo simula procesos como intercepción de la precipitación, infiltración, evaporación y absorción por parte de la vegetación, escorrentía superficial, flujo preferencial (derivada de la capa de suelo), intercambio de humedad entre las capas de suelo, los drenajes desde la capa de suelo a la zona de aguas subterráneas y drenajes hacia en canal del rio desde las aguas subterránea (Roo et al., 2013).

### 3.2 Evapotranspiración

En la Figura 3.3 se presenta cómo toma en cuenta el modelo las áreas de estudio mediante fracciones, si están formadas por áreas construidas, áreas boscosas, los cuales alteran el balance de agua, que determina la cantidad de agua que ingresará al terreno.

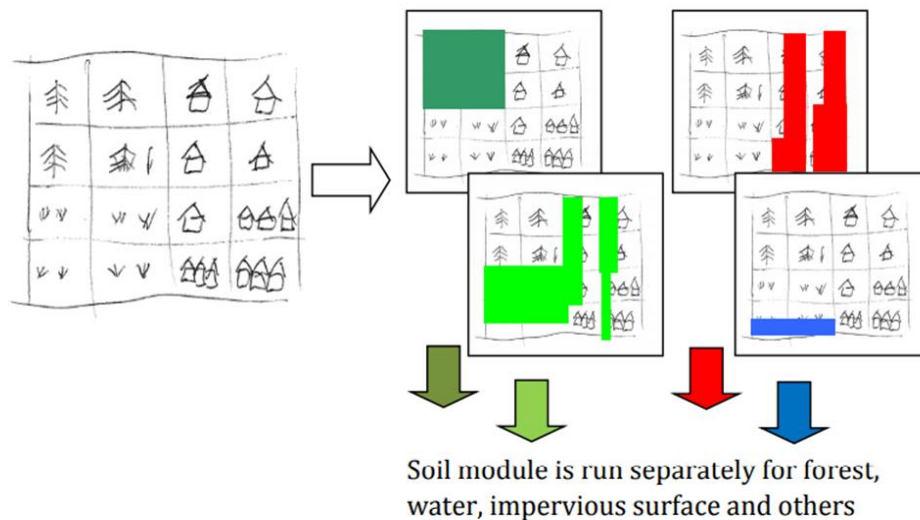


Figura 3.3 El área verde oscura se le considera área boscosa ( $F_{forest}$ ), las columnas rojas se le considera áreas impermeables ( $F_{dr}$ ), el color azul define cuerpos de aguas abiertas ( $F_{water}$ ) y el verde claro otras coberturas de suelo ( $F_{others}$ ) (Roo et al., 2013).

En la Figura 3.4 se presenta cómo el modelo ejecuta de manera independiente la evapotranspiración total como la suma de la evaporación, por la fracción de cada clase, ya sea fracción de agua ( $F_{water}$ ), fracción de escorrentía directa ( $F_{dr}$ ) considerándose como zona impermeable, fracción de bosques ( $F_{forest}$ ) y otra cobertura de suelo ( $F_{others}$ ).

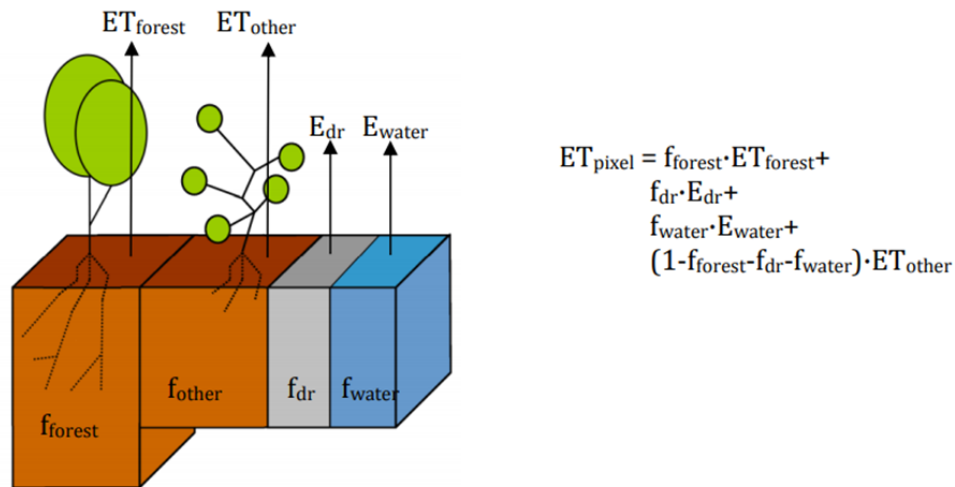


Figura 3.4 Cálculo de la evapotranspiración total (ET) del píxel mediante sus fracciones (Roo et al., 2013).

### 3.3 Humedad del suelo

La humedad del suelo simulada por el modelo LISFLOOD, se modela actualmente en tres capas: la superior, media e inferior.

La humedad del suelo que se muestra en la página web de EFAS es la humedad media del suelo calculada a partir de la fracción de bosque ( $F_{\text{forest}}$ ) y otra cobertura de suelo ( $F_{\text{others}}$ ) para las dos capas superiores (1 y 2) (Wetterhall, 2021).

En la web, la humedad del suelo se calcula como la humedad relativa media del suelo en las dos capas superiores, también conocida como índice de humedad del suelo.

La humedad del suelo que se muestra en el EFAS-IS, es en realidad el índice de humedad del suelo, calculado como un promedio durante todo el período de pronóstico (Wetterhall, 2021).



SM en EFAS-IS es el contenido de humedad del suelo (SM) medio para las dos capas superiores.

Se toma una profundidad para cada capa del suelo, la cual se obtiene del archivo EFAS, que es la profundidad acumulada desde la parte superior de la superficie hasta la parte inferior de cada capa.

El modelo evalúa el contenido de humedad del suelo entre las capas de suelo, considerando que el flujo es totalmente movilizado en una sola dirección, que es vertical (1D), impulsada por la gravedad, se simula iniciando por la ecuación 1. La Ley de Darcy (Roo et al., 2013).

$$q = -K(\theta) \left[ \frac{\partial h(\theta)}{\partial z} - 1 \right] \quad (1)$$

Donde:  $q$  es el caudal del suelo (capa superior y capa inferior) en  $\frac{mm}{dia}$ ,  $k$  es la conductividad hidráulica en  $\frac{mm}{dia}$  (como función del contenido volumétrico de agua en el suelo) y  $\frac{\partial h(\theta)}{\partial z}$  es el gradiente de potencial matricial.

Se asume que el gradiente es cero (0), la ecuación 1 se simplifica a:

$$q = K(\theta) \quad (2)$$

Esto induce a un flujo que va siempre hacia abajo, a un caudal igual a la conductividad hidráulica del suelo. La relación entre la conductividad hidráulica y el estado de humedad del suelo se describe mediante la ecuación de Van Genuchten (Genuchten, 1980).

$$K(w) = K_s \left( \frac{w - w_r}{w_s - w_r} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{w - w_r}{w_s - w_r} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2 \quad (3)$$

Donde:  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada del suelo,  $w$  es el contenido de humedad del suelo,  $w_r$  es el contenido de humedad residual del suelo,  $w_s$  es el contenido de humedad máxima.

$$m = \frac{\lambda}{\lambda + 1} \quad (4)$$

$m$  es el parámetro, que se calcula a partir del índice de tamaño de poro  $\lambda$  (que está relacionado con la textura del suelo).

Para el cálculo de la humedad del suelo es necesario conocer los mapas estáticos, el punto de marchitez y la capacidad de campo de cada capa.

- Punto de Marchitez

Se define como la cantidad mínima de agua en el suelo que la planta necesita para no marchitarse. Si el contenido de agua del suelo disminuye a éste o cualquier punto más bajo, la planta se marchita y ya no puede recuperar su turgencia cuando se coloca en una atmósfera saturada durante 12 horas (Wetterhall, 2021).

- Capacidad de campo

Es la cantidad de humedad del suelo o contenido de agua retenido en el suelo, después de que el exceso de agua se ha drenado y la tasa de movimiento descendente ha disminuido (Wetterhall, 2021).

### 3.4 Mapas de entrada en el Modelo

LISFLOOD genera una gran variedad de resultados. Para ello son necesarios ciertos archivos de entrada como mapas o tablas, para iniciar las simulaciones tales como:

- Mapas Topográficos
- Mapas de cobertura de suelo
- Mapas de textura de suelo
- Mapas de geometría del canal
- Mapas de condiciones meteorológicas
- Mapas de desarrollo de la vegetación

Al ejecutar el modelo, se recomienda realizar un calentamiento previo como mínimo de un año, lo que permitirá estimar estados iniciales de humedad en el suelo, debido a que generalmente se tienen dos situaciones:

- Se conocen todos los estados iniciales de las variables
- Se desconocen todos los estados iniciales de las variables

La segunda situación es con la que frecuentemente contamos y para establecer un estado inicial de humedad en el terreno, se realizan 3 simulaciones en el Modelo LISFLOOD para la capa superior del suelo (Roo et al., 2013).

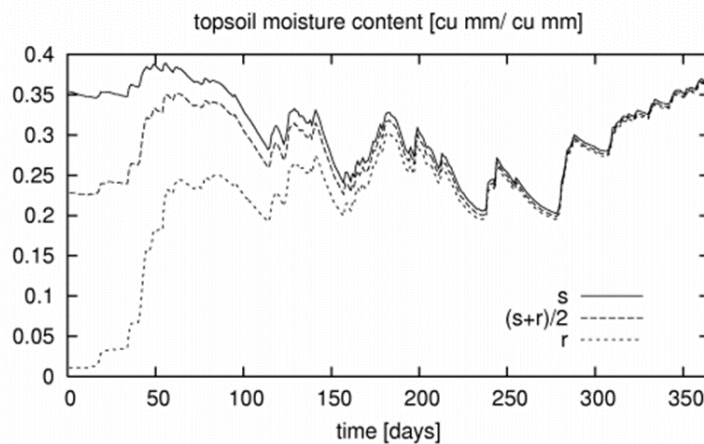


Figura 3.5 Inicialización del Modelo LISFLOOD para las variables de estado (Roo et al., 2013).

En la Figura 3.5 se presenta una primera simulación donde el suelo está completamente saturado, una segunda simulación donde el suelo está completamente seco y sólo contiene humedad residual y una tercera simulación, donde la humedad del suelo está entre los extremos de las dos primeras simulaciones.

Como se observa los primeros 8 meses, las 3 simulaciones tienen una cantidad de humedad distinta, luego cada gráfica tiende a tener la misma cantidad de humedad en el suelo, este caso lleva a utilizar el año anterior como periodo de calentamiento para obtener condiciones iniciales de humedad (Roo et al., 2013).

### 3.5 Procesos para el cálculo de la humedad

Para generar el cálculo de la humedad del suelo, es necesario recuperar de los datos de almacenamiento climático (CDS) la profundidad desde la superficie del suelo, hasta el fondo de la capa (Wetterhall, 2021).

Punto de Marchitez

$$PtoM = \frac{(PtoM1 * Sd1) + (PtoM2 * Sd2)}{Sd1 + Sd2} \quad (5)$$

Donde: *PtoM* es el punto de Marchitez, *PtoM1* es el punto de Marchitez de la capa 1, *Sd1* es la profundidad del suelo de la capa 1, *PtoM2* es el punto de Marchitez de la capa 2, *Sd2* es la profundidad del suelo de la capa 2.

Capacidad de Campo

$$CapC = \frac{(CapC1 * Sd1) + (CapC2 * Sd2)}{Sd1 + Sd2} \quad (6)$$

Donde: *CapC* es la capacidad de campo, *CapC1* es la capacidad de campo de la capa 1, *CapC2* es la capacidad de campo de la capa 2.

La humedad media del suelo para ambas capas se calcula como la media de todos los pasos del pronóstico, en el pronóstico de 10 días que impulsa el pronóstico de alta resolución del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts):

$$HST = \frac{(Media(vwc1) * Sd1) + (Media(vwc2) * Sd2)}{Sd1 + Sd2} \quad (7)$$

Donde:  $HST$  es la humedad de suelo total,  $vwc1$  es el contenido de agua en la capa 1,  $vwc2$  es el contenido de agua en la capa 2.

La humedad media del suelo se calcula sobre el pronóstico de 10 días.

$$HS = \frac{HST - PtoM}{CapC - PtoM} \quad (8)$$

Donde:  $PtoM$  es el punto de Marchitez,  $CapC$  es la capacidad de campo y  $HST$  es la humedad del suelo total.

## 4 METODOLOGIA

La metodología utilizada fue a base de datos diarios observados en campo, de contenido de humedad de suelo a distintas profundidades desde mayo a octubre 2019 en tres zonas de Cataluña: Parc UPC Agropolis, Cercs (Pirineo Oriental), Senet (Pirineo Central).

En cada zona de estudio se evaluó el contenido de humedad del terreno a distintas profundidades, junto con la precipitación obtenidas por los Pluviómetros diarios; luego en el proceso, utilicé el contenido de humedad que genera EFAS (European Flood Awareness System) a través de LISFLOOD, modelo hidrológico, el cual tiene como enfoque principal el análisis de las cuencas de Europa.

Se pretende comparar, la calidad de los datos simulados por el modelo LISFLOOD, con los datos diarios de humedad del suelo obtenidos por las observaciones “in situ” de las tres (3) zonas, a fin de que se puedan validar y sustituir los datos en campo.

Esta comparación se realiza ya que no se cuenta con observaciones “in situ” de contenido de humedad en todo el territorio catalán, en ese sentido, la idea es validar la simulación de VWC (Contenido volumétrico de agua) de EFAS por el modelo LISFLOOD y utilizarlas en distintas áreas de Cataluña.

El modelo LISFLOOD simula el contenido de humedad del suelo en nivel 1, nivel 2 y nivel 3, primero se analizaron los 3 niveles con la precipitación obtenida en cada zona de estudio para el periodo de mayo a octubre 2019 y se evaluó la tendencia que tenía cada nivel con las precipitaciones.

Luego se procedió a evaluar los datos diarios de contenido de humedad, observados en campo, con los datos simulados por el del nivel 1 del modelo; es importante señalar que cada zona cuenta con observaciones de campo a distintas profundidades.

Igualmente se realizaron comparaciones de los datos diarios observados en campo con los datos simulados del nivel 2 del modelo.

Al observar esta comparación, se observó que el nivel 2 se ajustaba más a los datos de campo y por ello, se realizó una correlación de Pearson, la cual indico que tan alto o bajo es el grado de asociación que tiene el nivel 1 o el nivel 2 de LISFLOOD, con los datos de humedad observados en campo.

La correlación de Pearson clasifica el grado de asociación o la relación lineal de los datos a través de un rango de valores, donde valores del 50% o por debajo de este, se considera moderada o débil, sin embargo, valores de 50% o mayor, se consideran significativa y fuerte.

Posteriormente al análisis realizado, se evaluó los datos simulados por LISFLOOD de contenido de humedad del terreno, para su utilidad en un análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite.

Para este análisis he deducido la ecuación de factor de seguridad mediante el método de talud infinito, lo cual depende de parámetros resistente del terreno y su geometría, a su vez esta ecuación depende de la tensión de succión, la cual relaciona el grado de saturación o contenido volumétrico de agua y la succión en la zona de estudio.

Para determinar la succión ha sido necesario el uso de la ecuación de curva de retención (Genuchten, 1980) en la cual se despejó la succión, tal como se muestra en el anexo 1, para determinarla, dependía de parámetros del material obtenido en investigaciones realizadas por Mamani (2019), Guachizaca (2018) y Madrid (2012) correspondientes a Cercs, Agropolis y Senet respectivamente y de esta manera, evaluar la evolución del Factor de Seguridad en el periodo de mayo a octubre 2019.

De igual manera se realizó una correlación de Pearson entre los resultados de factor de seguridad obtenidos a través de los datos por las observaciones de campo y los datos simulados por el modelo LISFLOOD.

En el siguiente capítulo, se presentan los resultados obtenidos por observaciones en campo del contenido de humedad del suelo (VWC) y los simulados por el modelo LISFLOOD; y posteriormente el análisis de estabilidad mediante método de talud infinitos para cada zona de estudio.

## 5 RESULTADOS

La humedad del suelo por el Sistema de Alerta de Pronóstico de Europa (EFAS) es estimada por el Modelo hidrológico LISFLOOD, donde los valores de humedad del suelo se producen cada 24 horas, a las 06:00 UTC en toda Europa y con una resolución de 5 km (Lawrence et al., 2019).

La humedad inicial del suelo son los valores del ciclo anterior, la precipitación registrada durante 24 horas es distribuida por LISFLOOD en: capa de nieve, humedad del suelo (3 capas de tierra vegetal y 2 de subsuelo), agua subterránea dividida en capa superior, capa inferior y escorrentía superficial hacia el cauce del río.

Debido a que se desea mejorar los pronósticos de inundaciones por EFAS, se realiza una serie de evaluaciones comparativas entre los datos observados en tres zonas de Cataluña y lo datos de humedad del suelo simulados por el modelo LISFLOOD.

### 5.1 Parc Agropolis UPC.

#### 5.1.1 Análisis del contenido de humedad

Las observaciones de campo, por los sensores: Norte no Vegetado (NnV\_VWC) y Sur no Vegetado (SnV\_VWC) colocados a 6cm y 16cm de profundidad, presentan los cambios del contenido volumétrico de agua (VWC) obtenidos desde 01 mayo a 12 octubre 2019 los cuales se mantienen en un rango de 0.10 y 0.27  $m^3/m^3$  respectivamente.



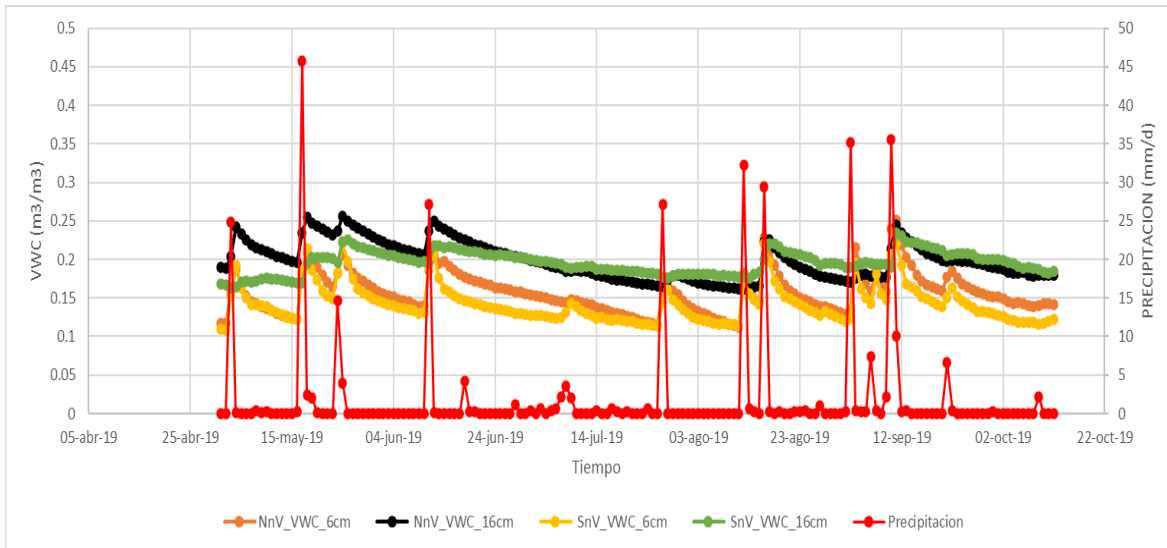


Figura 5.1 Contenido Volumétrico de Agua del Talud Norte y Sur No Vegetado

Tal como se observa en la Figura 5.1, que a mediados de junio ocurre un descenso en el contenido de humedad, debido al aumento de la temperatura en el suelo por los periodos de verano, se puede observar que existen precipitaciones en la zona, pero no mucha como para ejercer un cambio en el contenido volumétrico de agua.

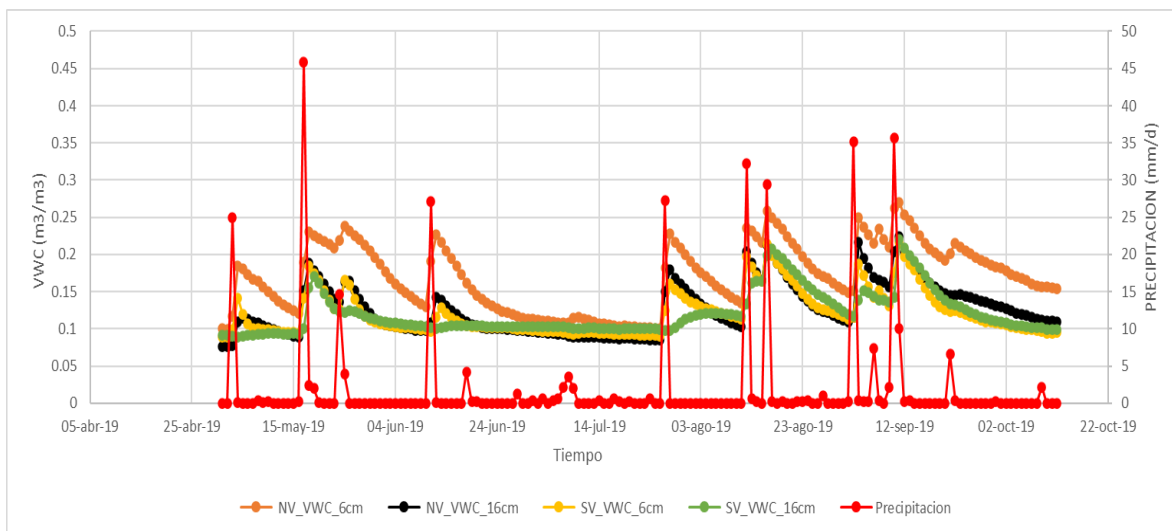


Figura 5.2 Contenido Volumétrico de Agua del Talud Norte y Sur Vegetado.

Se puede observar en la Figura 5.2, el cambio en el contenido de humedad, para las orientaciones de Norte y Sur Vegetado, cómo descenden los datos captados por los sensores de mayor profundidad, con las mismas precipitaciones que con respecto a las

orientaciones del talud sin vegetación, con un rango desde 0.05 a 0.30  $m^3/m^3$ ; esto debido a que parte del contenido de humedad en el terreno es absorbido por la vegetación presente, permitiéndole al suelo una cantidad mayor de succión por las raíces, las cuales modifican la porosidad del terreno.

En la Figura 5.3 se presenta el contenido volumétrico de agua (VWC) simulado por el modelo hidrológico en la zona de estudio Parc Agropolis UPC desde el 01 de mayo a 12 de octubre del 2019, en tres (3) distintos niveles, en conjunto con la precipitación diaria obtenidas por el pluviómetro (ECRN-100 high-resolution rain gauge, METER).

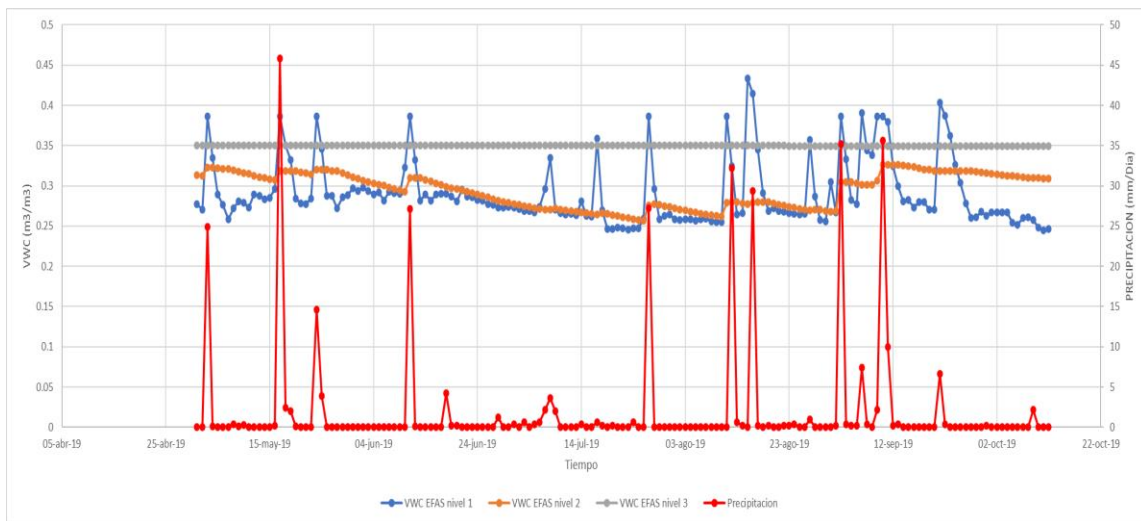


Figura 5.3 Simulaciones del contenido de humedad en la zona por EFAS en tres (3) niveles.

De esta manera, se realizó una comparación entre los niveles simulados con los datos observados. En la Figura 5.4 se presentan para el mismo periodo temporal, los datos observados para las orientaciones de Norte No Vegetado (NnV) y Sur No Vegetado (SnV) a profundidades de 6 y 16 cm, con el nivel 1 simulado por el modelo LISFLOOD.

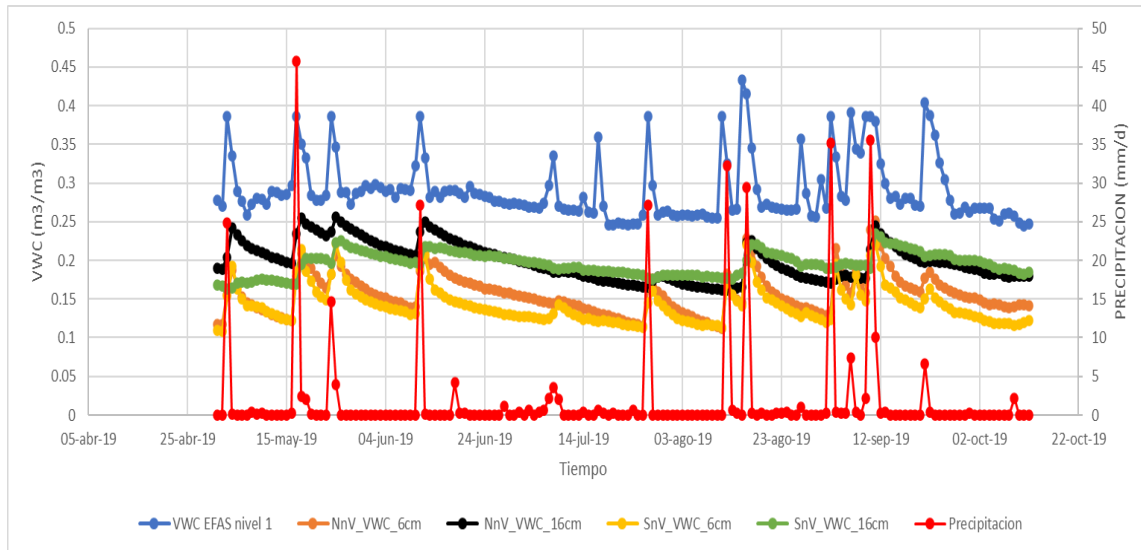


Figura 5.4 Nivel 1 simulado por el modelo LISFLOOD y datos observados en campo para las orientaciones NnV y SnV.

Tal como se muestra en la Figura 5.4, el contenido volumétrico de agua simulado por el modelo para el nivel 1, presenta humedades mayores, con un rango desde 0.24 a 0.44  $m^3/m^3$  comparado a los datos observados “In Situ”; esto da a analizar que posiblemente el modelo no elimina suficiente humedad en el terreno.

Sin embargo, se puede observar, que el modelo simula datos de VWC que van de acorde a los datos de precipitación y tendencias similares a los datos observados en campo.

En la Figura 5.5 se presenta el nivel 1 con las orientaciones del terraplén en la zona vegetada en la cual se tiene el Norte Vegetado (NV) y Sur Vegetado (SV) a las mismas profundidades.

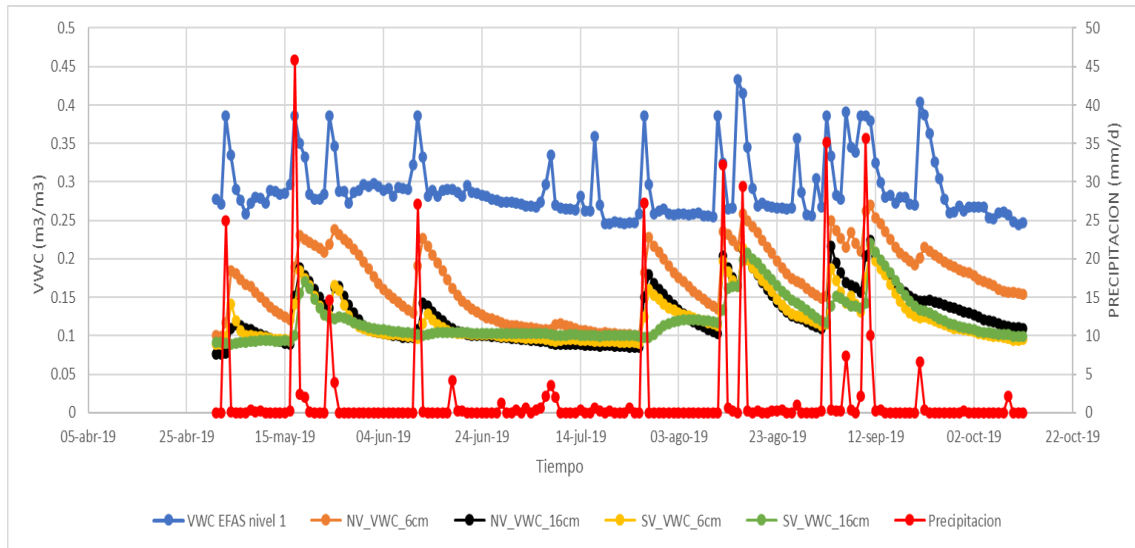


Figura 5.5 Nivel 1 simulado por el modelo LISFLOOD y datos observados en campo para las orientaciones NV y SV.

Se puede observar que el sensor en el talud con orientación norte localizado más cerca de la superficie, llega a tener un valor de VWC más cercano al nivel 1 simulado por el modelo que los demás sensores; esto es debido a que las raíces de la vegetación en esta orientación han modificado el índice de poros, permitiendo al terreno cambios en la succión.

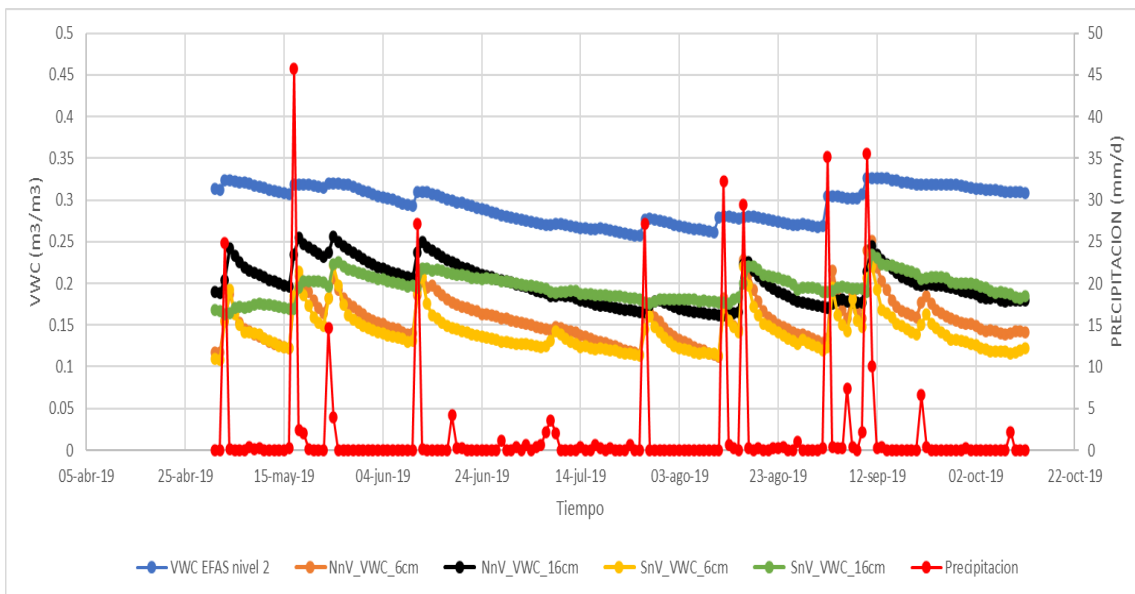


Figura 5.6 Nivel 2 simulado por el modelo LISFLOOD y datos observados en campo para las orientaciones NnV y SnV.

Luego se realizó la siguiente comparación tal como se muestra en la Figura 5.6; el contenido volumétrico de agua según el modelo para el nivel 2, el cual presenta humedades menores, comparado con los del nivel 1 desde  $(0.25 \text{ a } 0.35) \text{ m}^3/\text{m}^3$  y se analiza que tiene posiblemente una mayor correlación de contenido volumétrico de agua en el terreno con los datos observados “In Situ”.

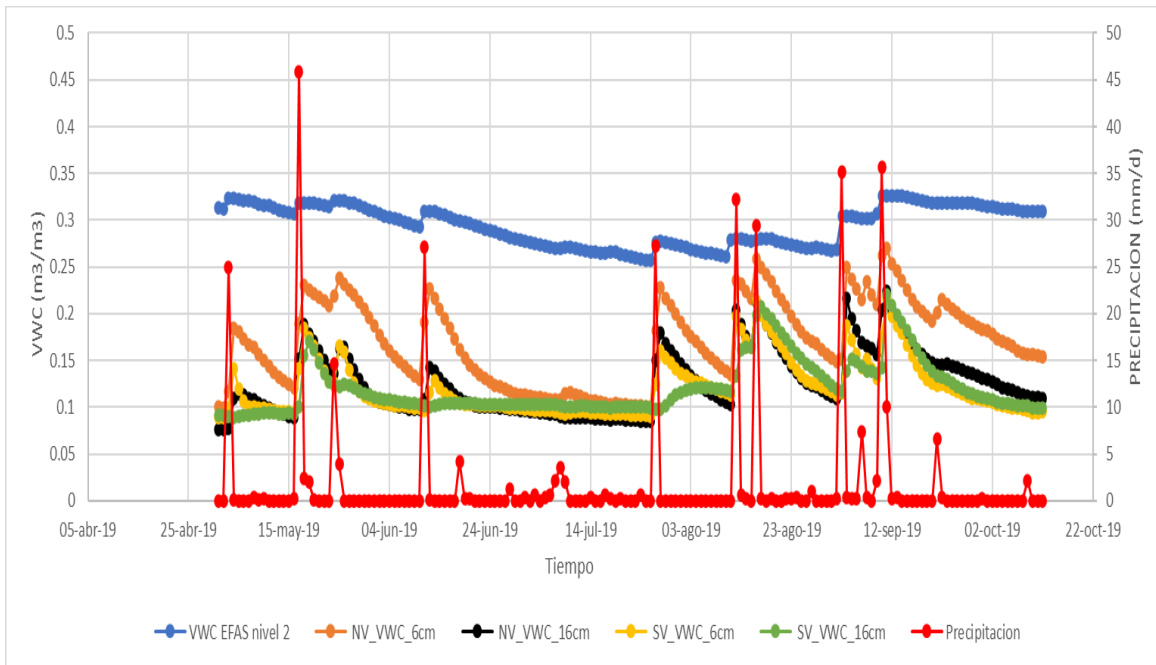


Figura 5.7 Nivel 2 simulado por el modelo LISFLOOD y datos observados en campo para las orientaciones NV y SV.

En la Figura 5.7 se presenta el mismo nivel 2, simulado por el modelo con las orientaciones del terraplén en la zona vegetada, para evaluar estos datos observados y comprender los datos simulados del nivel 2, se realizó una correlación de Pearson, de los datos del nivel 1 y el nivel 2 con los datos observados en campo.

Tabla 1: Correlación entre datos simulados por LISFLOOD y datos observados en campo Agropolis UPC.

Modelo LISFLOOD	Contenido de humedad y sus profundidades							
	NnV 6cm	NnV 16cm	SnV 6cm	SnV 16cm	NV 6cm	NV 16cm	SV 6cm	SV 16cm
LISFLOOD Nivel 1	0.49	0.26	0.56	0.09	0.38	0.36	0.36	0.26
LISFLOOD Nivel 2	0.5	0.65	0.46	0.29	0.49	0.32	0.17	0.1

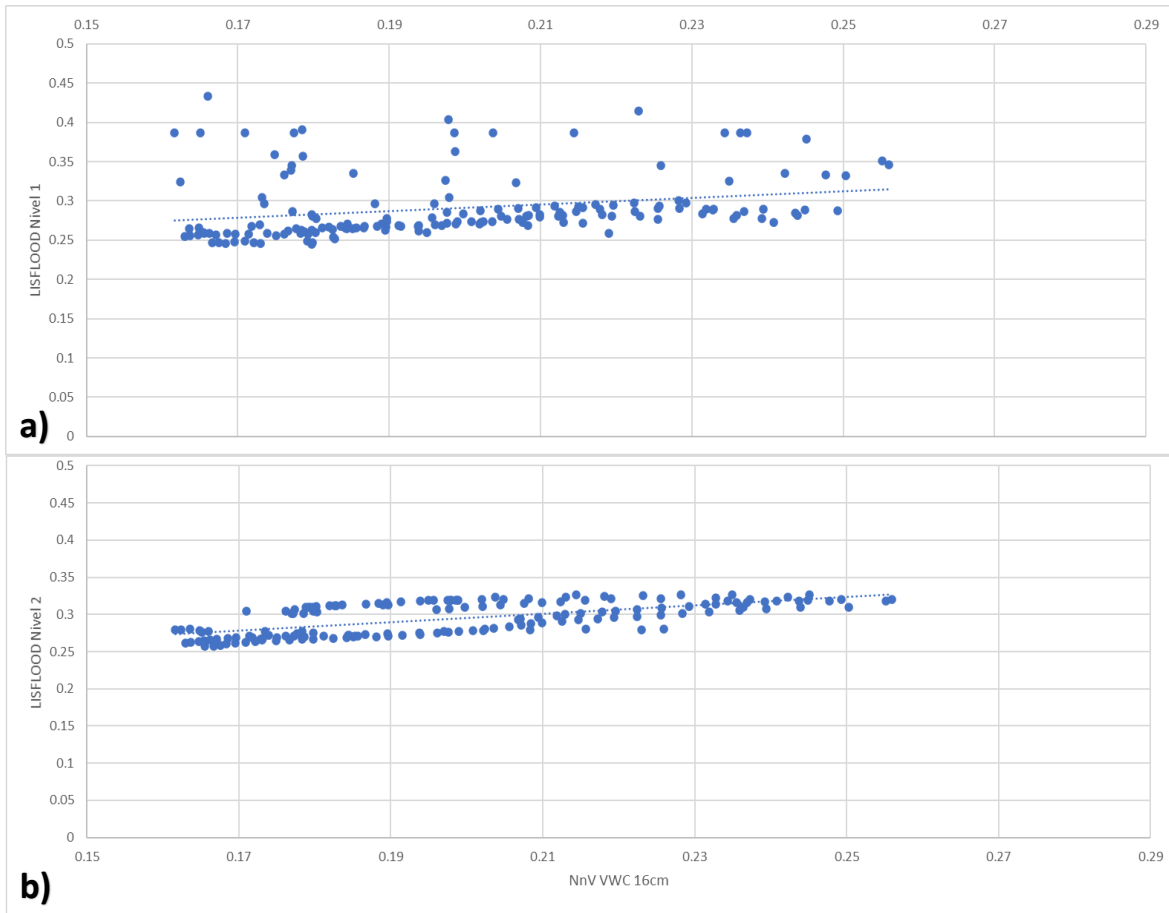


Figura 5.8 Gráfico de correlación entre los contenidos de humedad VWC de LISFLOOD y el sensor a 16 cm de profundidad con orientación Norte no Vegetado. a) Nivel 1 de LISFLOOD con grado de asociación del 26%. b) Nivel 2 de LISFLOOD con grado de asociación del 65%.

En la tabla 1 se detallan los porcentajes obtenidos mediante la correlación de Pearson, que tienen los datos observados en campo, con lo simulado por el modelo; donde el nivel 2 presenta un porcentaje mayor, con los datos observados en campo.

En la figura 5.8 se ilustra la relación lineal de los datos simulados por el nivel 1 y nivel 2 con el sensor a 16cm, con la orientación Norte No Vegetado (NnV), que explica la comparación presentada en las figuras 5.4 y figura 5.6.

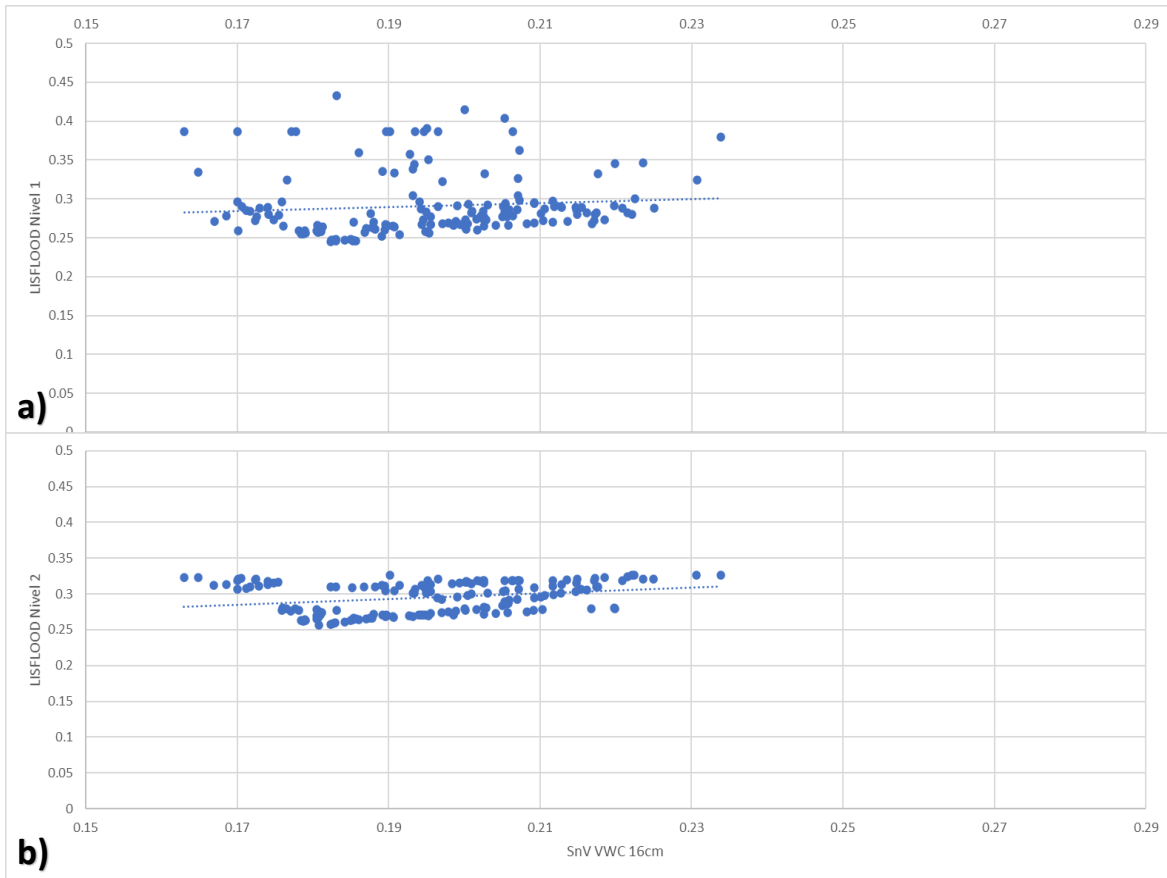


Figura 5.9 Gráfico de correlación entre los contenidos de humedad VWC de LISFLOOD y el sensor a 16 cm de profundidad con orientación Sur no Vegetado. a) Nivel 1 de LISFLOOD con grado de asociación del 9%. b) Nivel 2 de LISFLOOD con grado de asociación del 29%.

En la figura 5.9 se ilustra la relación lineal de los datos simulados por el nivel 1 y nivel 2 con el sensor a 16cm con la orientación Sur No Vegetado (SnV), que explica la comparación presentada en las figuras 5.4 y figura 5.6, de esta manera se puede observar el grado de asociación que tienen los datos observados de campo, con los datos simulados por LISFLOOD.

## 5.2 Cercs (Pre- Pirineo Oriental)

### 5.2.1 Análisis del contenido de humedad

El contenido de agua depende de la porosidad que contiene el terreno, determinar ambos parámetros nos permite conocer el grado de saturación existente en el suelo y evaluar si el terreno se encuentra en un estado de saturación.

En la Figura 5.10 se muestra el registro de datos obtenidos de precipitación y contenido volumétrico de agua (VWC) en la zona desde 01 de mayo a 12 de octubre de 2019 a tres (3) profundidades 11, 23 y 36 cm.

El agua juega un doble papel negativo en la resistencia de los materiales ya que reduce la resistencia al corte por las presiones intersticiales y aumenta los esfuerzos de corte por el incremento de peso en el terreno (González de Vallejo et al., 2002).

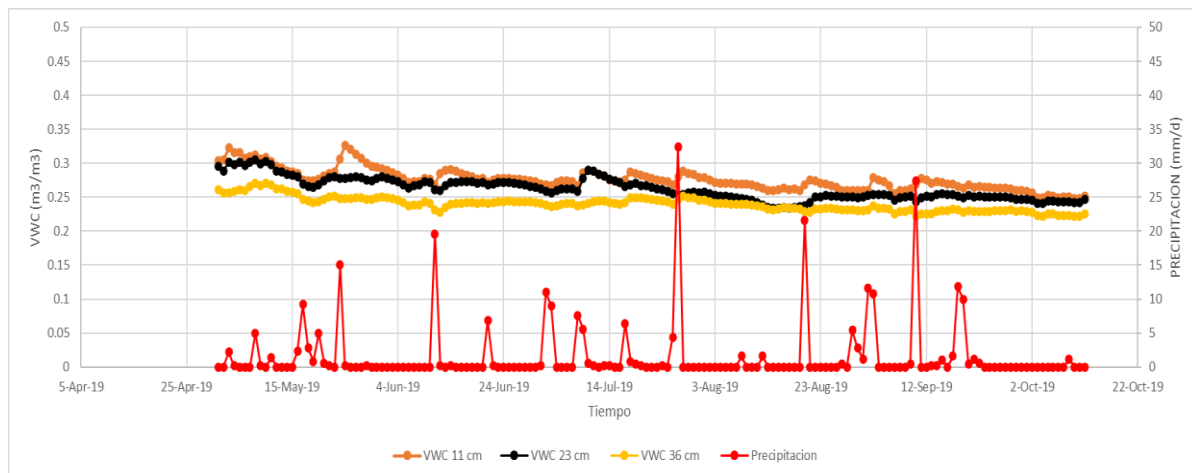


Figura 5.10 Contenido Volumétrico de Agua observadas en campo “In Situ” a tres (3) profundidades 11, 23 y 36 cm.

Como se observa en la Figura 5.10 el contenido volumétrico en la zona está en un rango de 0.20 a 0.35  $m^3/m^3$ . El sensor de contenido de agua (11cm) al encontrarse más cercano a la superficie presenta mayores porcentajes de contenido de humedad, con respecto a la precipitación.



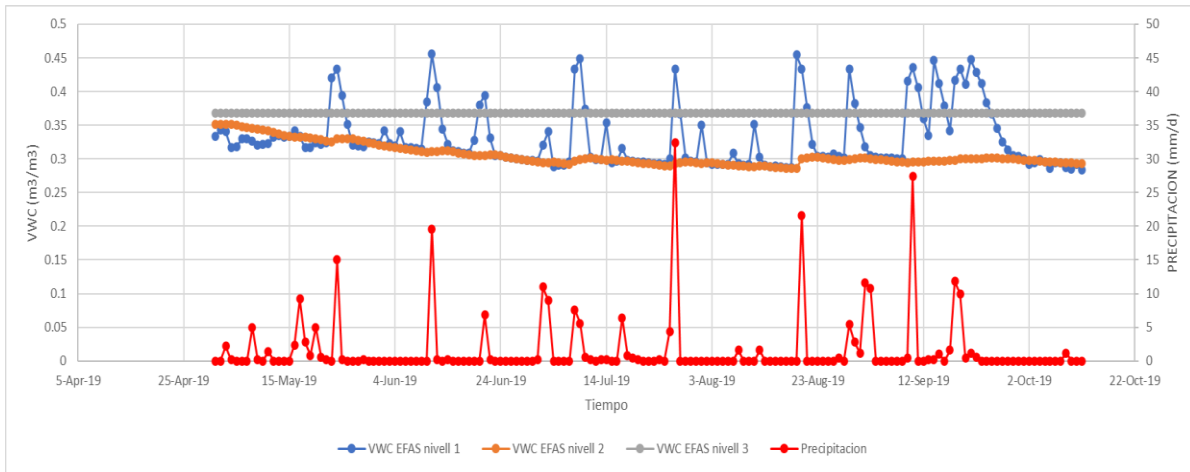


Figura 5.11 Simulaciones del contenido de humedad en la zona por EFAS en tres (3) niveles.

En la Figura 5.11 se presenta el contenido volumétrico de agua (VWC) simulado por el modelo hidrológico en la zona de estudio Cercs Pre- Pirineo Oriental, desde el 01 de mayo a 12 de octubre del 2019 en 3 distintos niveles, en conjunto con la precipitación diaria obtenidas mediante un pluviómetro en la estación METEO.

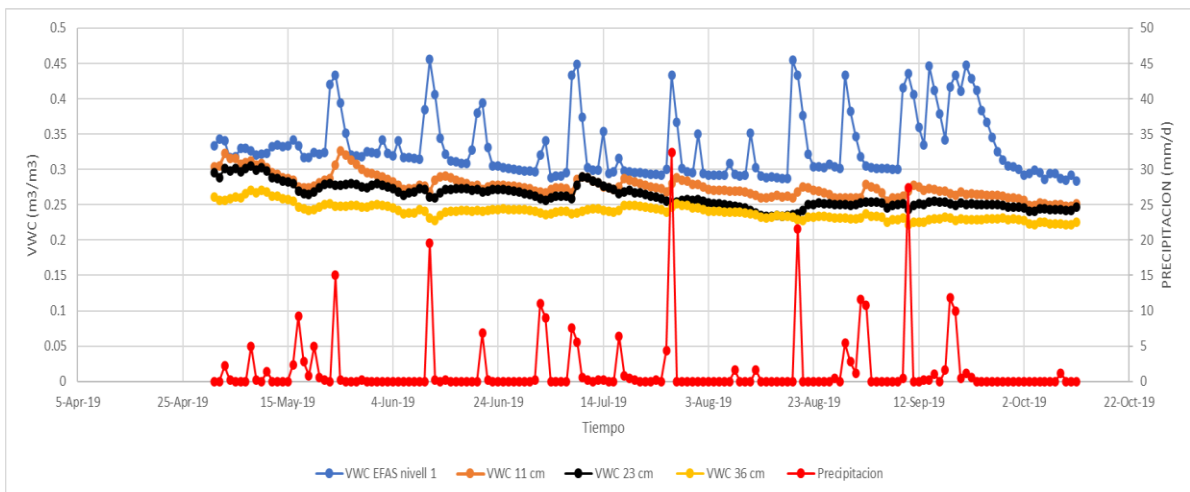


Figura 5.12 Nivel 1 simulado por el modelo Lisflood y datos observados en campo.

Tal como se presenta en la Figura 5.12 el nivel 1 simulado por el modelo, presenta un contenido volumétrico de agua desde 0.28 a 0.45  $m^3/m^3$ , lo cual es mucho mayor a lo que presentan los datos diarios observados en campo de contenido volumétrico de agua.

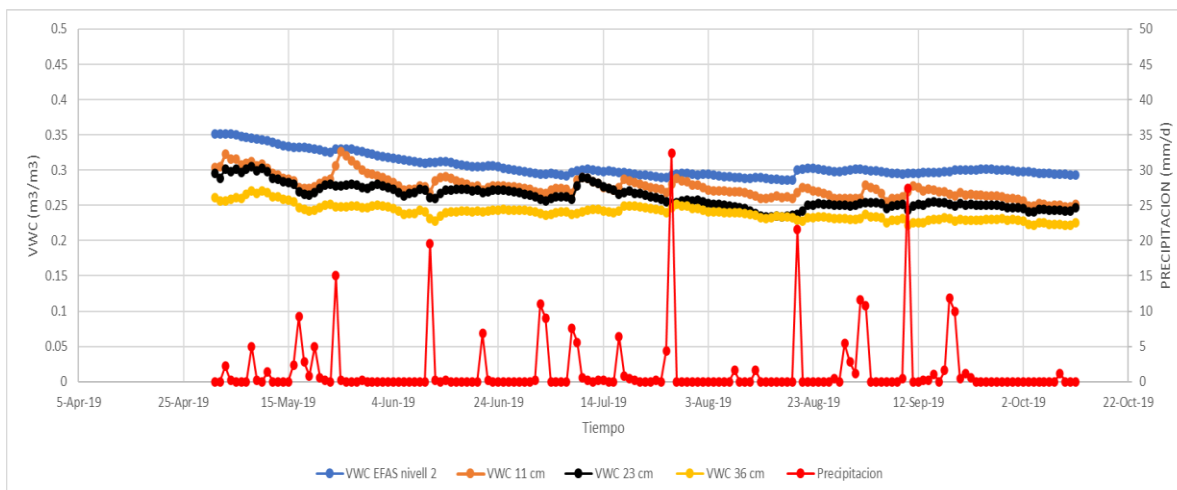


Figura 5.13 Nivel 2 simulado por el modelo LISFLOOD y datos observados en campo.

Tal como se presenta en la Figura 5.13, el nivel 2 simulado por el modelo LISFLOOD presenta un contenido volumétrico de agua con un rango desde  $0.29$  a  $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$  a diferencia de los datos diarios observados en campo.

Igualmente se puede observar cómo los datos simulados por el modelo del nivel 2, se ajustan más a los datos observados en campo, con las mismas condiciones de precipitación, por lo tanto, nuevamente se realizó una correlación de Pearson, para evaluar los datos observados en campo con los simulados por el modelo.

Tabla 2: Correlación entre datos simulados por LISFLOOD y datos observados en campo en Cercs.

Modelo LISFLOOD	Contenido de humedad y sus profundidades		
	vwc 11cm	vwc 23cm	vwc 36cm
LISFLOOD Nivel 1	0.1	0.02	-0.11
LISFLOOD Nivel 2	0.78	0.81	0.72

En la tabla 2, se presentan los porcentajes obtenidos mediante la correlación de Pearson en la ladera de Cercs, de tal manera que se presenta un grado de asociación de los datos observados en campo, con los simulados por el modelo, donde el Nivel 2 proyecta una relación lineal significativa en esta zona, mayor del 70% con los datos observados en campo.

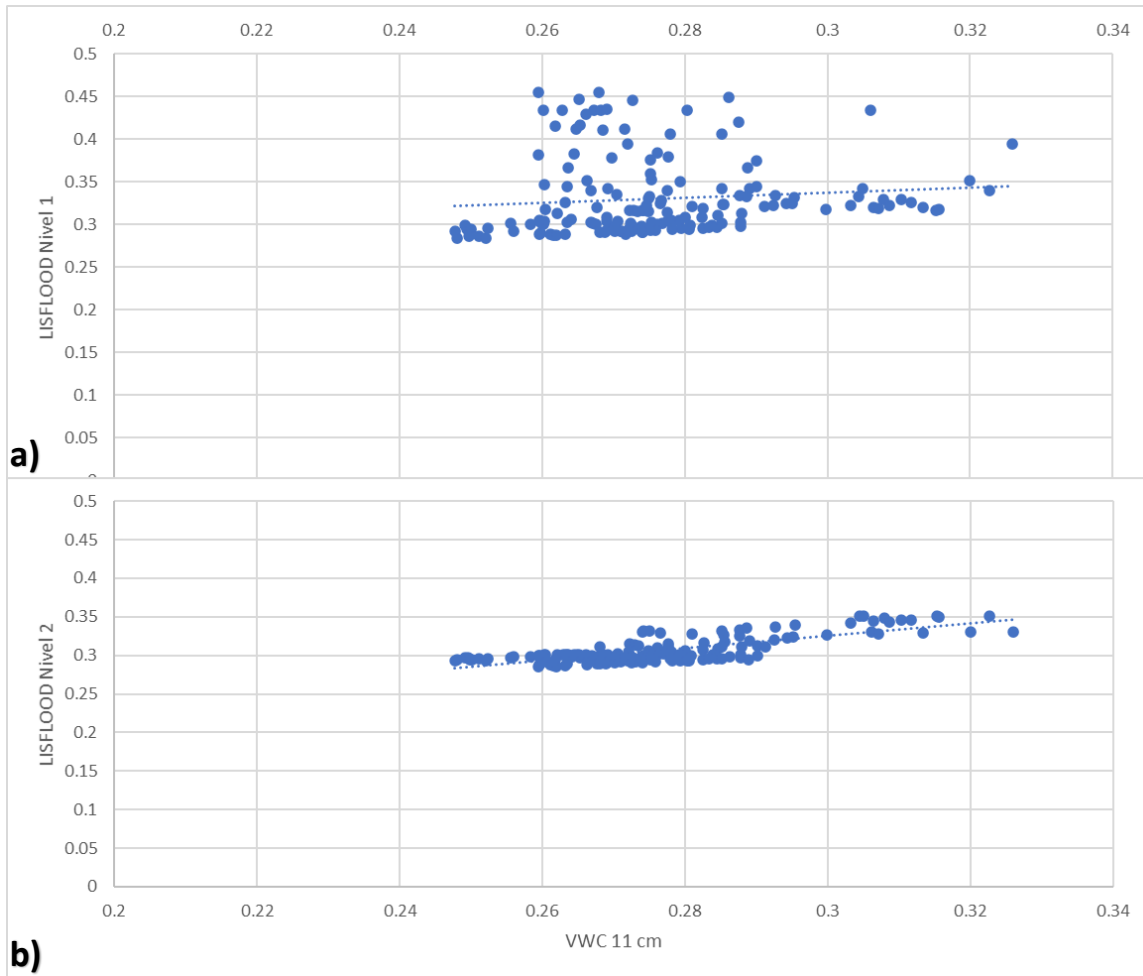


Figura 5.14 Gráfico de correlación entre los contenidos de humedad VWC de LISFLOOD y el sensor a 11 cm de profundidad. a) Nivel 1 de LISFLOOD con grado de asociación del 10%. b) Nivel 2 de LISFLOOD con grado de asociación del 78%.

En la figura 5.14 se presenta la relación lineal de los datos simulados por el nivel 1 y nivel 2 con el sensor a 11cm, que explica la comparación presentada en las figuras 5.12 y figura 5.13.

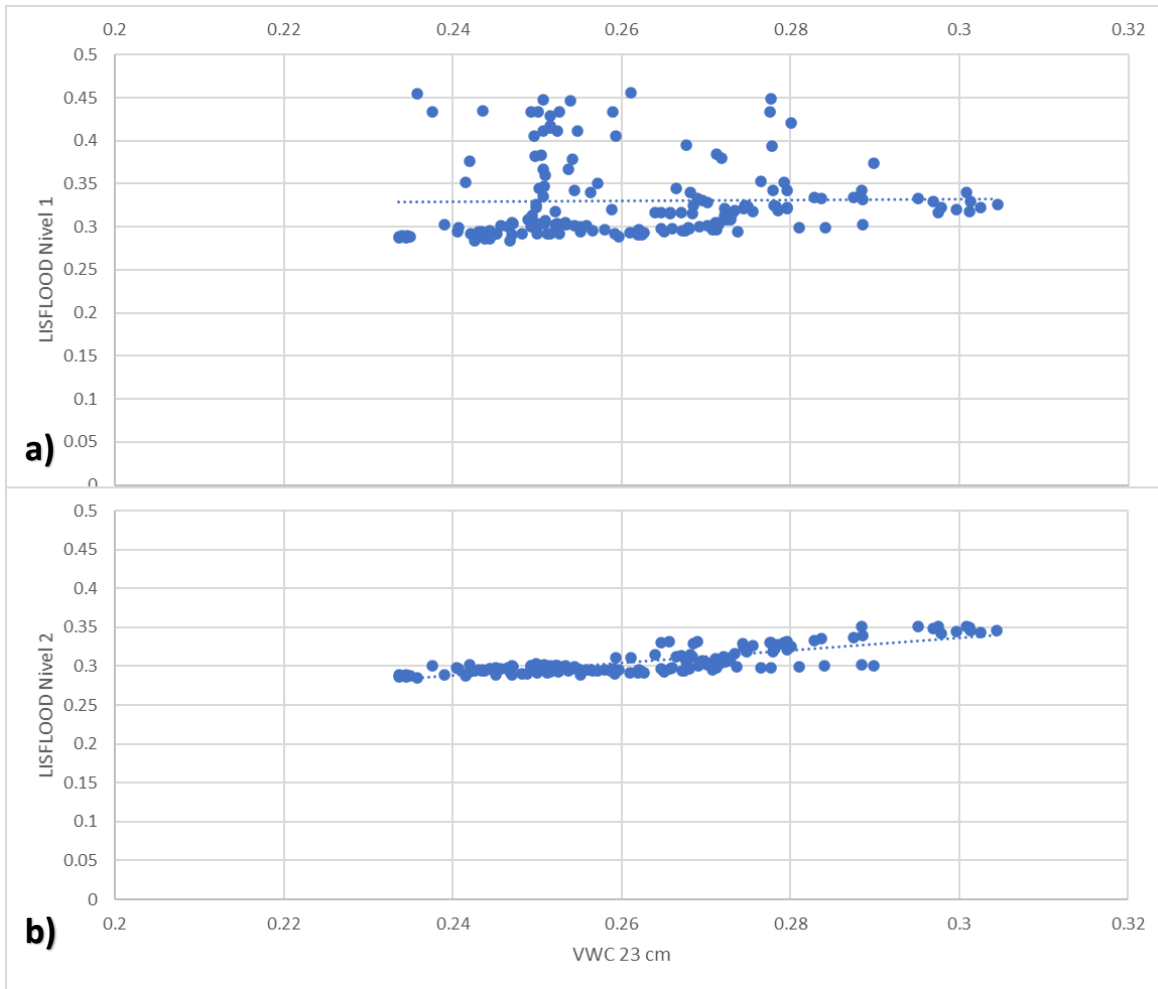


Figura 5.15 Gráfico de correlación entre los contenidos de humedad VWC de LISFLOOD y el sensor a 23 cm de profundidad. a) Nivel 1 de LISFLOOD con grado de asociación del 2%.  
 b) Nivel 2 de LISFLOOD con grado de asociación del 81%.

En la figura 5.15 se ilustra la relación lineal de los datos simulados por el nivel 1 y nivel 2 con el sensor a 23cm, donde explica de igual manera el gran ajuste que presenta el nivel 2 en la figura 5.13 con los datos de contenido de humedad en campo.

### 5.3 Senet (Pririneo Central)

#### 5.3.1 Análisis del contenido de humedad

En la Figura 5.16 se observan los cambios de contenido de humedad por los 4 sensores más superficiales ubicados a 5 cm, 15 cm, 30 cm y 50 cm de profundidad, se observa que desde el 24 de junio inicios del periodo de verano, se registran descensos en el contenido volumétrico de agua, producto de la temperatura.

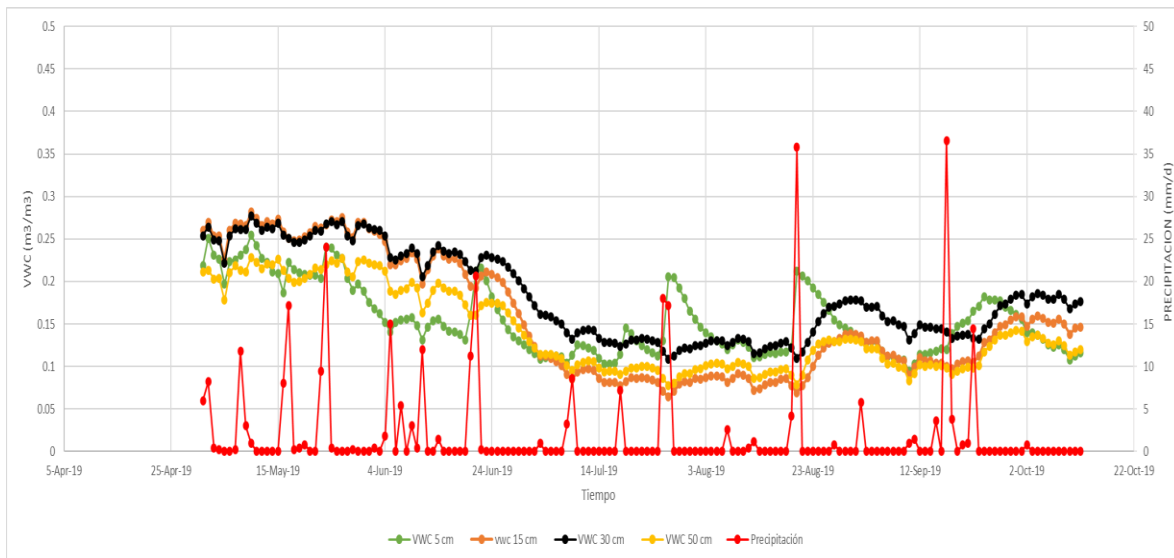


Figura 5.16 Contenido Volumétrico de Agua observadas en campo “In Situ” a tres (4) profundidades 5, 15, 30 y 50 cm.

Estas medidas observadas in situ, son de gran importancia para determinar la capacidad de campo, que caracteriza la zona, se presentan contenidos volumétricos de agua en un rango desde  $0.06$  a  $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ .

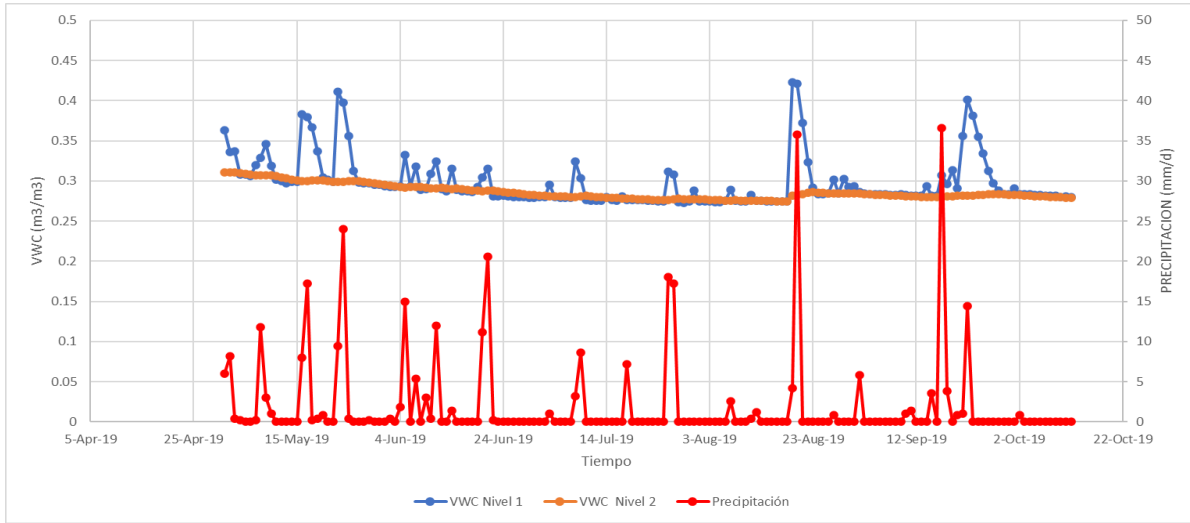


Figura 5.17 Simulaciones del contenido de humedad en la zona por EFAS en tres (3) niveles.

En la Figura 5.17 se presenta el contenido volumétrico de agua (VWC) simulado por el modelo hidrológico en la zona de estudio Senet Pirineo Central, desde el 01 de mayo a 12 de octubre del 2019 en 3 distintos niveles, en conjunto con la precipitación diaria obtenidas por la estación meteorológica instalada en el barranco.

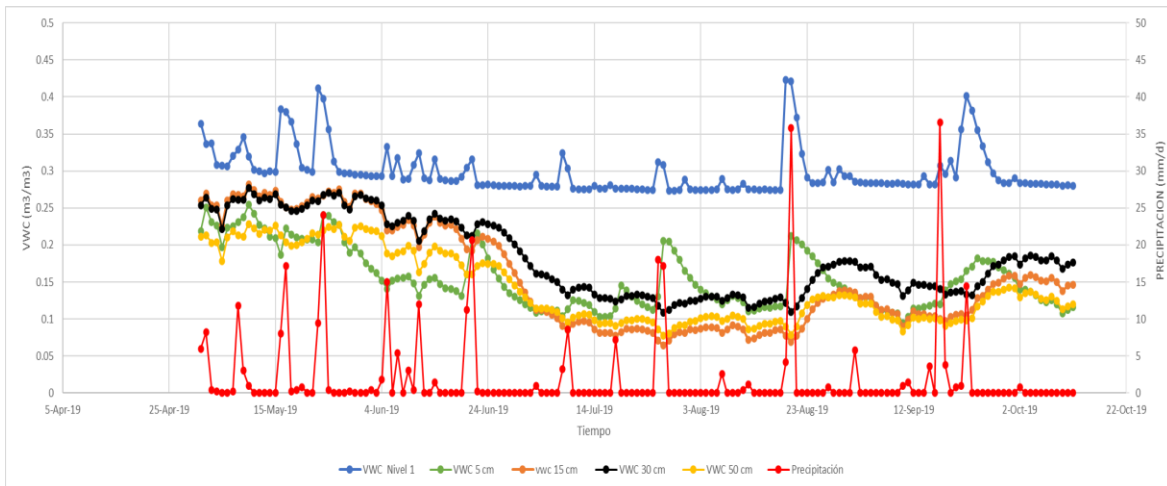


Figura 5.18 Nivel 1 simulado por el modelo LISFLOOD y datos observados en campo a cuatro (4) profundidades.

En la Figura 5.18 se presenta el nivel 1 simulado por el modelo con un contenido volumétrico de agua desde 0.26 a 0.45  $m^3/m^3$ , lo cual es mucho mayor a lo que presentan los datos diarios observados en campo de contenido volumétrico de agua.

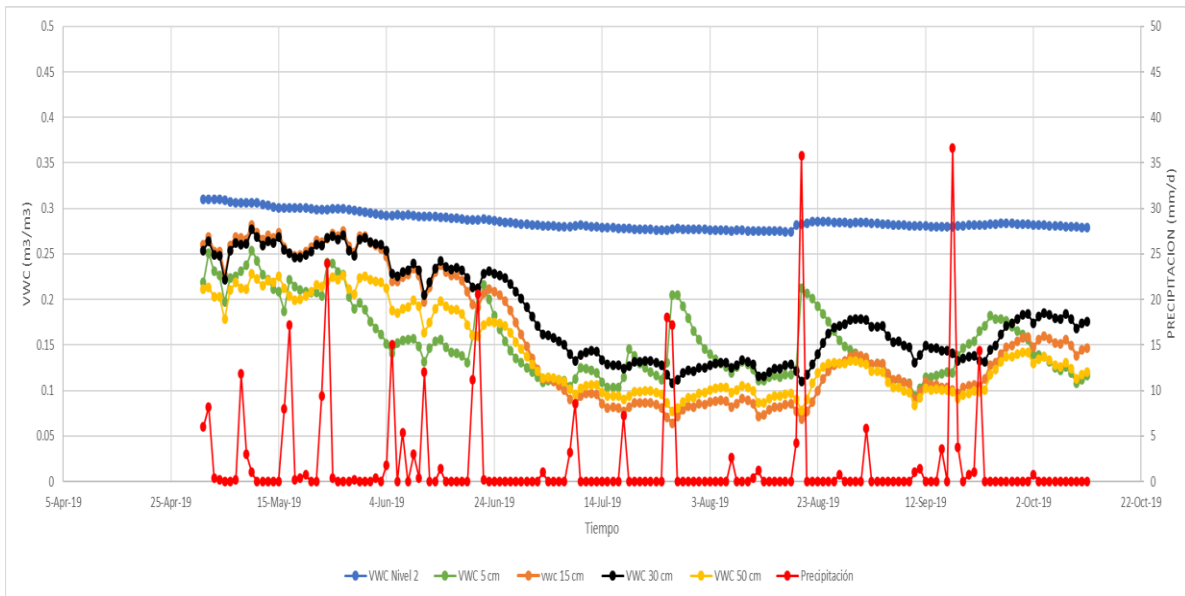


Figura 5.19 Nivel 2 simulado por el modelo LISFLOOD y datos observados en campo.

En la Figura 5.19 el nivel 2 simulado por el modelo LISFLOOD, presenta un contenido volumétrico de agua con un rango desde 0.26 a 0.32  $m^3/m^3$ . Estos datos simulados por el modelo presentan una mayor correlación con los datos observados en campo tal como se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3: Correlación entre datos simulados por LISFLOOD y datos observados en campo en Senet.

Modelo LISFLOOD	Contenido de Humedad y sus profundidades			
	vwc 5cm	vwc 15cm	vwc 30cm	vwc 50cm
LISFLOOD Nivel 1	0.52	0.32	0.28	0.31
LISFLOOD Nivel 2	0.8	0.91	0.89	0.91

En la tabla 3, se presentan los porcentajes obtenidos mediante la correlación de Pearson en Senet, donde el Nivel 2 del modelo LISFLOOD, proyecta una relación lineal, mayor del 80% con los datos observados en campo.

En la figura 5.20 se ilustra la relación lineal de los datos simulados por el nivel 1 y nivel 2 con el sensor a 15cm, donde los datos simulados por el modelo LISFLOOD nivel 2, presentan una relación lineal alta.

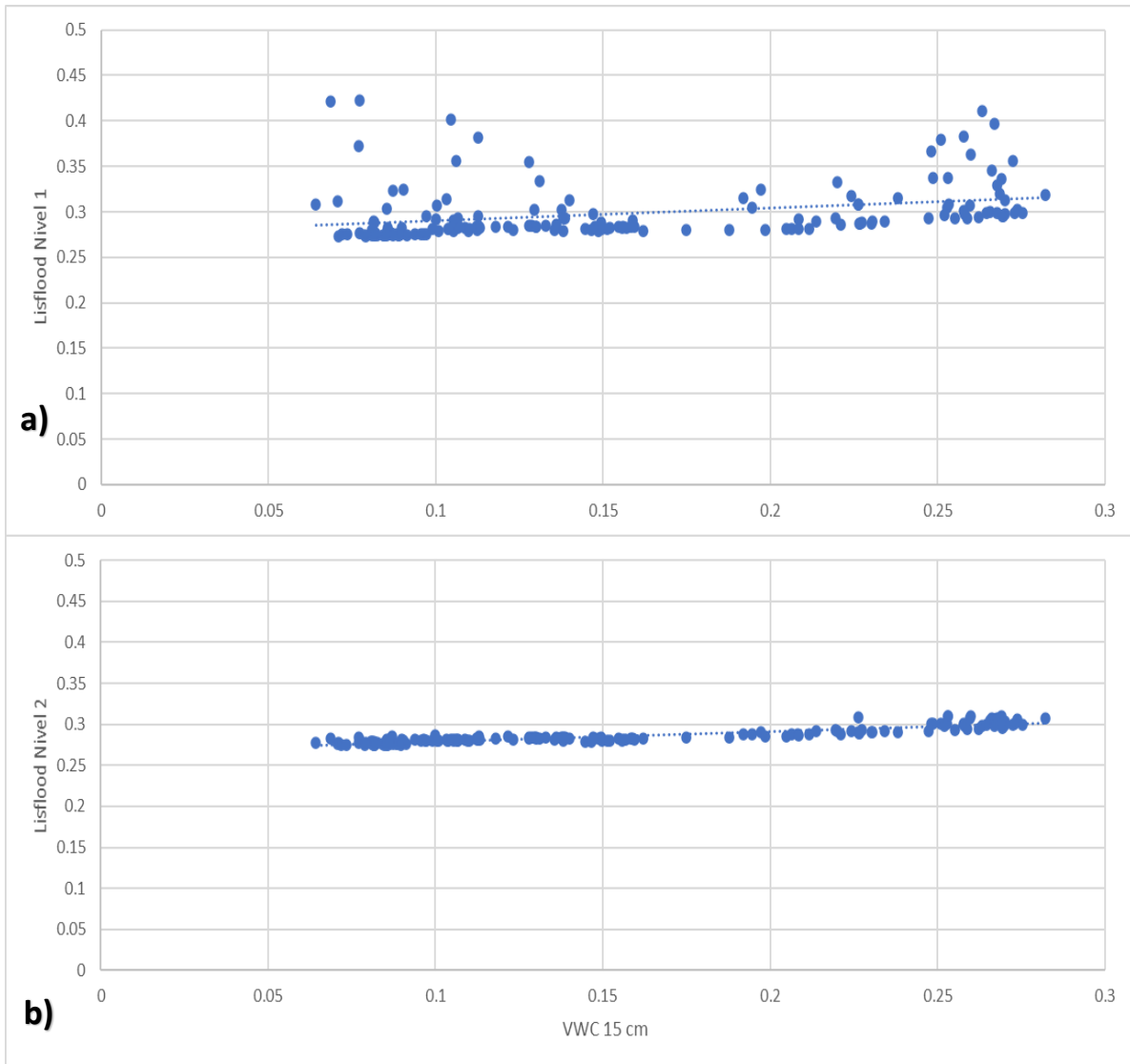


Figura 5.20 Gráfico de correlación entre los contenidos de humedad VWC de LISFLOOD y el sensor a 15 cm de profundidad. a) Nivel 1 de LISFLOOD con grado de asociación del 32%. b) Nivel 2 de LISFLOOD con grado de asociación del 91%.



En la figura 5.21 se ilustra la relación lineal que tienen los datos simulados por el nivel 1 y el nivel 2 del modelo LISFLOOD, con los datos observados en campo a 50 cm de profundidad donde el nivel 2 presenta una alta relación lineal.

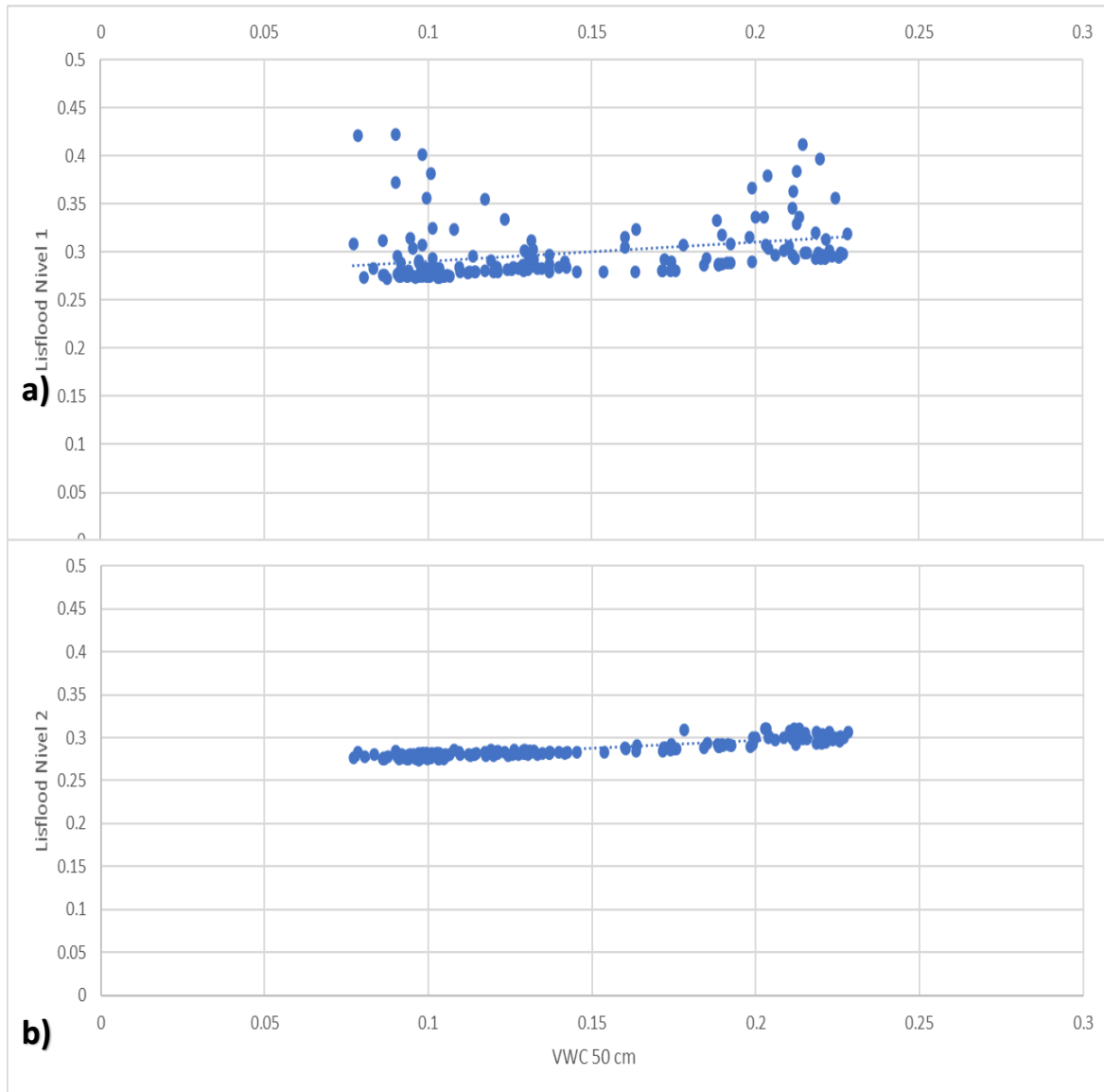


Figura 5.21 Gráfico de correlación entre los contenidos de humedad VWC de LISFLOOD y el sensor a 50 cm de profundidad. a) Nivel 1 de LISFLOOD con grado de asociación del 31%. b) Nivel 2 de LISFLOOD con grado de asociación del 91%.

## 6 ANALISIS DE ESTABILIDAD

### 6.1 Introducción

Los análisis de estabilidad se consideran para el diseño de taludes o evaluación de laderas, cuando presentan problemas de inestabilidad. Se aplica un coeficiente de seguridad adecuado, dependiendo de la finalidad de la obra (González de Vallejo et al., 2002).

Para evaluar un problema de estabilidad se deben tomar en cuenta las ecuaciones que tengan que ver con el equilibrio, en la mayoría de los casos nos encontramos con terrenos saturados, lo cual, de cierta manera, complica nuestro análisis y de allí la importancia de los métodos de análisis de estabilidad, que consideran un planteamiento matemático, en el que intervienen fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que interactúan sobre el talud y determinan las condiciones de estabilidad.

Se evalúan las estabilidades mediante los dos métodos siguientes:

- Métodos determinísticos: se conoce el estado en el cual se encuentra el talud y así decidir si es estable o no. De ellos se otorgan los parámetros resistentes que indican el comportamiento del material que definen el factor de seguridad del talud, de esta manera se desarrolla el método de equilibrio límite y métodos tenso-deformacionales.
- Métodos probabilísticos: se considera la probabilidad en la que el talud presente fallas bajo ciertas condiciones. Se conocen las funciones de distribución de diferentes variables aleatorias en los análisis, y de ellos realizándose cálculos del factor de seguridad mediante procesos iterativos.

Escoger el método indicado de análisis, dependerá de los datos disponibles del talud y sus condiciones de contorno (hidrogeológicos, geológicos, geomecánicas), características geomecánicas de los materiales ya sea que se trate de un macizo rocoso o suelo.

No se podrá desarrollar un análisis adecuado si no se cuenta con los datos suficientes, al igual que un caso complejo no podrá ser determinado por un método simple si sólo se cuenta con pocos datos de campo o laboratorio. De tal manera, tanto los datos que obtenemos en campo o en laboratorio deberían ser en función del método de estabilidad que se vaya a emplear.

Debido a que los métodos probabilísticos presentan dificultades, no es muy común su aplicación y por ello utilizamos el método determinístico, que trata en función del método de equilibrio límite.

## 6.2 Método de equilibrio límite

Los métodos de equilibrio límite evalúan el equilibrio de un cuerpo de volumen de masa potencialmente inestable y consisten en comparar las fuerzas tendentes al movimiento, con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una determinada superficie (línea recta, arco circular), la cuales se basan en la definición del coeficiente de seguridad, la selección de una superficie teórica de rotura y el criterio de rotura de Mohr-Coulomb.

Por lo general, se asumen condiciones como la de la resistencia que se desplaza a lo largo del plano de rotura, la geometría de la superficie debe permitir el deslizamiento, las fuerzas que interactúan podrá ser modelada utilizando datos del material (peso específico, presión de agua, etc.).

Los métodos de equilibrio límite se clasifican en (González de Vallejo et al., 2002):

- Métodos que consideran el análisis del bloque o masa total.
- Métodos que consideran la masa dividida en rebanadas o fajas verticales.

Los primeros métodos son válidos para terrenos homogéneos y sólo se realiza la comparación de fuerzas en un punto de la superficie de rotura (González de Vallejo et al., 2002).

El segundo método se usa para materiales no homogéneo que abarcan una serie de hipótesis sobre la ubicación o posición de las fuerzas que actúan sobre las rebanadas. Los métodos de rebanadas más comunes son el de Bishop modificado y el de Jambu, válidos para el análisis de roturas curvas (González de Vallejo et al., 2002).

En este caso, se realiza un análisis mediante el método de talud infinito a 2 zonas de estudio, utilizando los datos simulados por el modelo LISFLOOD, y así determinar un coeficiente de seguridad obtenido al aplicar las fuerzas externas descritas en el anexo 2.

Debido a que 2 de nuestras zonas de estudios se consideran laderas activas, estos análisis de estabilidad nos permiten tomar decisiones o medidas de corrección adecuadas para evitar nuevos movimientos.

### 6.3 Talud infinito

Este método para el análisis de estabilidad considera una rotura paralela al talud, tal como se presenta en la Figura 6.1, ya que se puede adaptar a diversas laderas naturales, donde la superficie de rotura se considera por contacto.

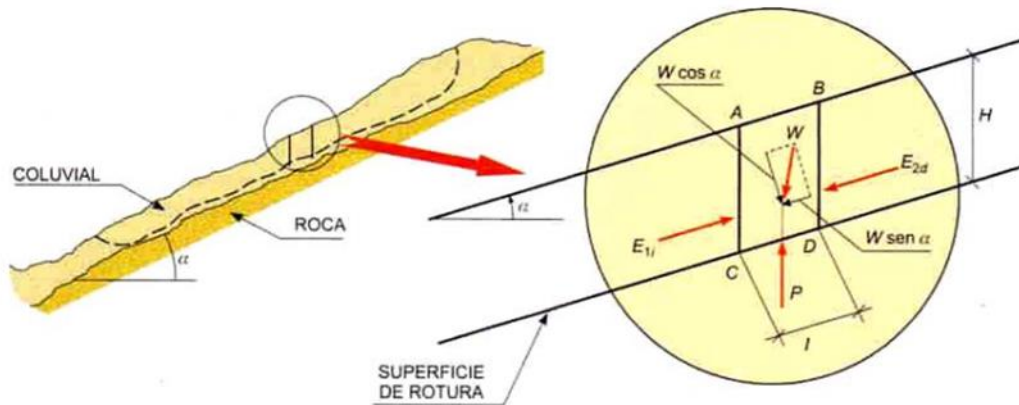


Figura 6.1 Rotura en un Talud "Infinito" (González de Vallejo et al., 2002)

Este método es el más utilizado para el análisis de estabilidad de ladera, que dependen de distintas condiciones tales como rotura circular en pie, rotura circular profunda, rotura según una poligonal y rotura plana. Sólo es necesario analizar una sección sometidas a fuerzas internas y externas.

De esta manera el coeficiente de seguridad está dada por:

$$FS = \frac{\tau_{resist.}}{\tau_{movi.}} = \frac{\sigma_n \tan \phi'}{F_t} \quad (9)$$

Donde:  $FS$  es el coeficiente de factor de seguridad,  $\tau_{resist.}$  son las fuerzas resistentes,  $\tau_{movi.}$  Son las fuerzas desestabilizadoras.

$$\sigma_n = \frac{W \cos \beta}{l} = \gamma H \cos^2 \beta \quad (10)$$

$$F_t = \frac{w \operatorname{sen} \beta}{l} = \gamma H \operatorname{sen} \beta \cos \beta \quad (11)$$

Donde:  $\sigma_n$  es la tensión normal,  $F_t$  son fuerzas que tienden al movimiento,  $\phi'$  es el rozamiento efectivo,  $\gamma$  es el peso específico del terreno,  $w \cos \beta$  es la componente estabilizadora del peso,  $w \operatorname{sen} \beta$  es el componente del peso que tiende al deslizamiento y  $l$  es la longitud de la base.

$$FS = \frac{c' + \sigma_n \tan \phi'}{F_t} \quad (12)$$

Si existe cohesión ( $c'$ ) en el terreno ésta se incluye a la ecuación 9, como adición a las fuerzas resistentes, de igual manera se detalla la deducción en el anexo 2.

#### 6.4 Cálculo de Factor de Seguridad

La resistencia al corte en suelos saturados se determina a partir de tensiones efectivas que definió (Terzaghi, 1936). Sin embargo, para describir la resistencia al corte para suelos parcialmente saturados se detallan mediante 2 variables de tensiones como: succión matricial y tensión neta.

En este cálculo se hace énfasis en el criterio propuesto por (Lu y Likos, 2004) que se define como la unión general para obtener la tensión efectiva en suelos saturados y no saturados, tal como se presenta en la siguiente ecuación:

$$\sigma' = (\sigma - P_g) - \sigma^s \quad (13)$$

Donde:  $P_g$  es la presión de gas (aire);  $\sigma^s$  es definido como la tensión de succión a partir de la curva característica del suelo en función de:

$$\sigma^s = f(P_g - P_l) \quad P_g - P_l > 0 \quad (14)$$

Donde:  $P_g$ , es la presión de gas (aire);  $P_l$  es la presión de líquido y  $f$  es la función definida a partir del contenido volumétrico de agua o grado de saturación efectiva. De esta manera la tensión de succión  $\sigma^s$  queda descrita de la siguiente manera (Lu & Likos, 2004):

$$\sigma^s = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} (s) = - \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} (s) \quad (15)$$

Donde:  $\theta$  es el contenido volumétrico de agua;  $\theta_r$  contenido volumétrico de agua residual;  $\theta_s$  es el contenido volumétrico de agua máxima;  $S_l$  es el grado de saturación;  $S_{ls}$  es el grado de saturación máxima;  $S_{rl}$  grado de saturación residual;  $P_g$  presión de gas;  $P_l$  presión de líquido (agua); succión ( $P_g - P_l$ ).

Planteamiento por talud infinito para calcular la evolución de factor de seguridad mediante datos simulados por el Modelo LISFLOOD (2019).

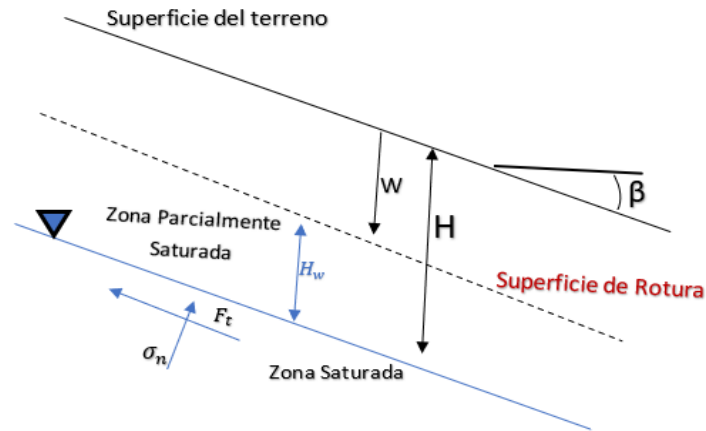


Figura 6.2 Método del Talud infinito

Para evaluar el factor de seguridad de manera analítica por el método de talud infinito (Figura 6.2). se ha realizado por (Lu y Likos, 2004) un cambio en la ecuación proponiendo la tensión efectiva de suelos saturados y parcialmente saturados  $\sigma' = (\sigma - P_g) - \sigma^s$ , en vez de la tensión efectiva de Terzaghi  $\sigma' = (\sigma - P_w)$ ; así, la ecuación para el factor de seguridad la determinamos de la siguiente manera:

$$FS = \frac{c' + (\gamma H \cos^2 \beta - \sigma^s) \tan \phi}{\gamma H \sin \beta \cos \beta} \quad (16)$$

Donde: ( $c'$ ) y ( $\phi$ ) son parámetros del suelo cohesión y ángulo de fricción respectivamente, ( $\beta$ ) es la inclinación del talud de  $12^\circ$ ; ( $H$ ) es la profundidad donde se sitúa la superficie de rotura con un valor de 0.6m respecto a la superficie,  $\gamma$  es peso específico del material;  $\sigma^s$  es definido como la tensión de succión a partir de la curva de retención que relaciona la succión y el grado de saturación.

Para evaluar esta tensión de succión  $\sigma^s$  fue necesario los parámetros del material y la ecuación de curva de retención obtenidos mediante literaturas e investigaciones realizadas en cada área de estudio, “La curva de retención es intrínseca de cada suelo y asociada directamente con la composición granulométrica, mineralógica y estructura del suelo” (Fredlund y Rahardjo, 1993).

#### 6.4.1 Factor de Seguridad en Cercs

Para poder determinar el cálculo de factor de seguridad, se asumió la capa de argilita alterada y la de coluvial como una sola capa y para ello se utilizaron características del material del coluvión en la curva de retención y parámetros relacionados a la resistencia del terreno del estrato de Argilita alterada (Mamani, 2019), descritos en la tabla 4:

Tabla 4: Parámetros de los materiales para la curva de retención y parámetros resistentes del terreno.

Parámetros	Variable	Unidad	Argilita Alterada
<b>Curva de retención (Modelo Van Genuchten)</b>			
Valor de entrada de aire	$P_o$	[MPa]	0.159
Tensión superficial del agua	$\sigma_o$	[N/m]	0.072
Factor de Forma del modelo Van Genuchten	$\lambda$	[-]	0.31
Valor de saturación residual	$S_{rl}$	[-]	0.55
Valor de saturación máxima	$S_{ls}$	[-]	1
<b>Parámetros de resistencia del terreno</b>			
Peso específico	$\gamma$	[KN/m <sup>3</sup> ]	20.6
Cohesión	$c'$	Kpa	0
Angulo de Fricción	$\phi'$	°	15

Para observar el análisis de cálculo de factor de seguridad fue necesario el uso de los valores de grado de saturación de los sensores y por el modelo LISFLOOD.

En ese sentido transforme el contenido volumétrico de agua, dividiendo los valores de VWC entre la porosidad del material obtenida en laboratorio por Mamani (2019), de la cual se definieron como condiciones iniciales con un valor para el coluvial de 0.373, argilita alterada de 0.356 y argilita inalterada de 0.322.

En la figura 6.3 se presentan el orden y profundidad de los estratos. De esta manera se realizó el cálculo preliminar del factor de seguridad por el contenido de humedad simulado por el modelo y compararlos de la misma forma con el factor de seguridad por el contenido de humedad de los datos observados en campo.



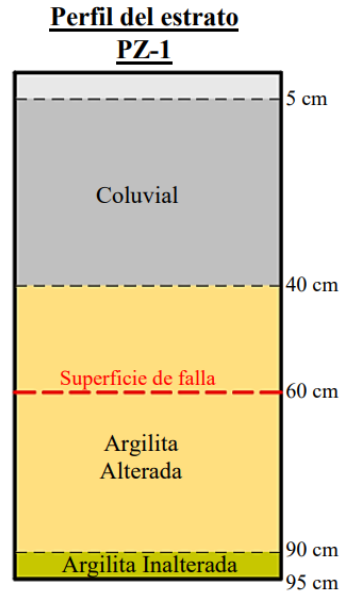


Figura 6.3 Profundidad y orden geológica de los materiales en Cercs (Mamani, 2019)

Los datos experimentales se ajustan al modelo de (Genuchten, 1980) y se expresa de la siguiente manera:

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left[ 1 + \left( \frac{P_g - P_l}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (17)$$

Donde:  $S_e$  es el grado de saturación efectiva;  $S_{rl}$  grado de saturación residual;  $S_{ls}$  grado de saturación máxima;  $P_g$  presión de gas,  $P_l$  presión de líquido;  $\lambda$  y  $P$  son parámetros del modelo Van Genuchten y  $S_l$  grado de saturación que varía en función del tiempo, la cual fue obtenida mediante los sensores in situ y el modelo LISFLOOD.

El valor de la succión utilizada para este análisis fue obtenido al despejar  $S = P_g - P_l$ , de la ecuación 17. En la figura 6.4 se presenta la variación del factor de seguridad para el periodo 2019 de los datos observados en campo.

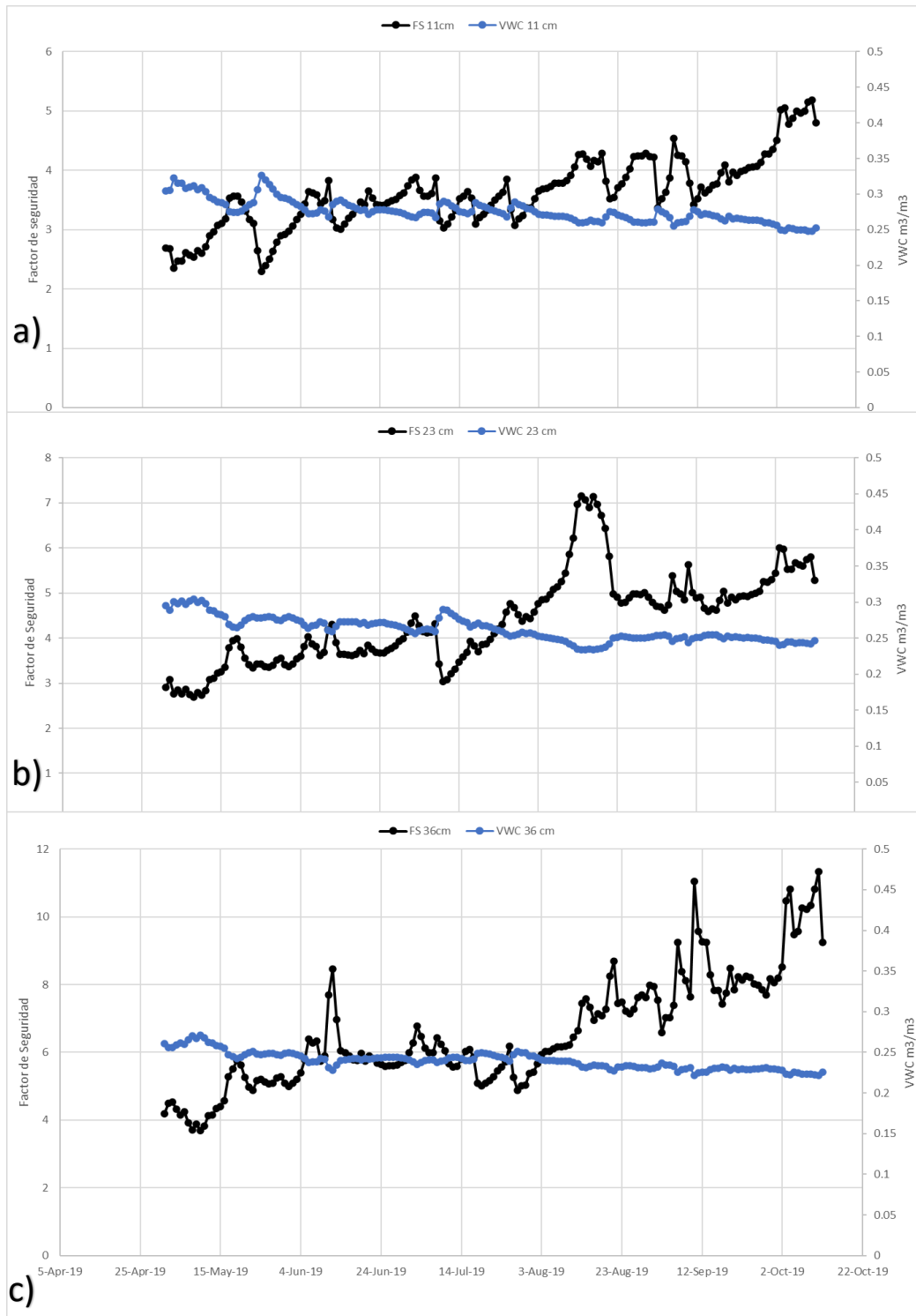


Figura 6.4 Evolución del Factor de seguridad según el sensor a) 11cm de profundidad b) 23cm de profundidad y c) 36cm de profundidad.

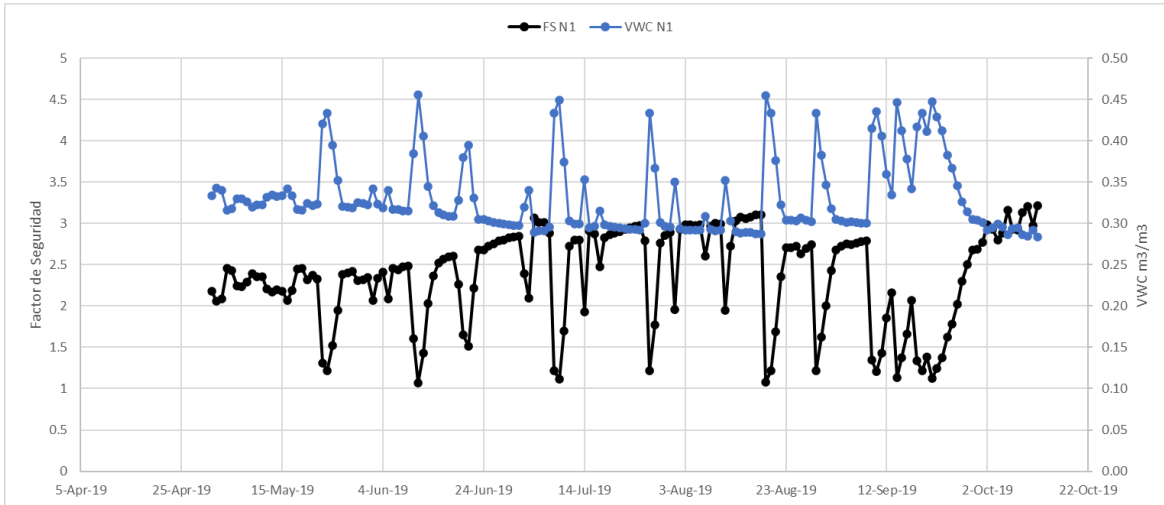


Figura 6.5 Variación de Factor de Seguridad diario por el nivel 1 de LISFLOOD para el periodo de mayo a octubre 2019.

La figura 6.4 deduce, que a medida que se incrementa el contenido de humedad en el terreno, se ocasiona una disminución de la resistencia al corte, por ende, el factor de seguridad disminuye y cuando existe una proporción menor de contenido de humedad en el terreno, la succión aumenta, lo que favorece al factor de seguridad; en la figura 6.5 y figura 6.6 se registran los datos simulados para el periodo establecido, un factor de seguridad mínimo de 1.07 por el nivel 1 y 1.95 por el nivel 2.

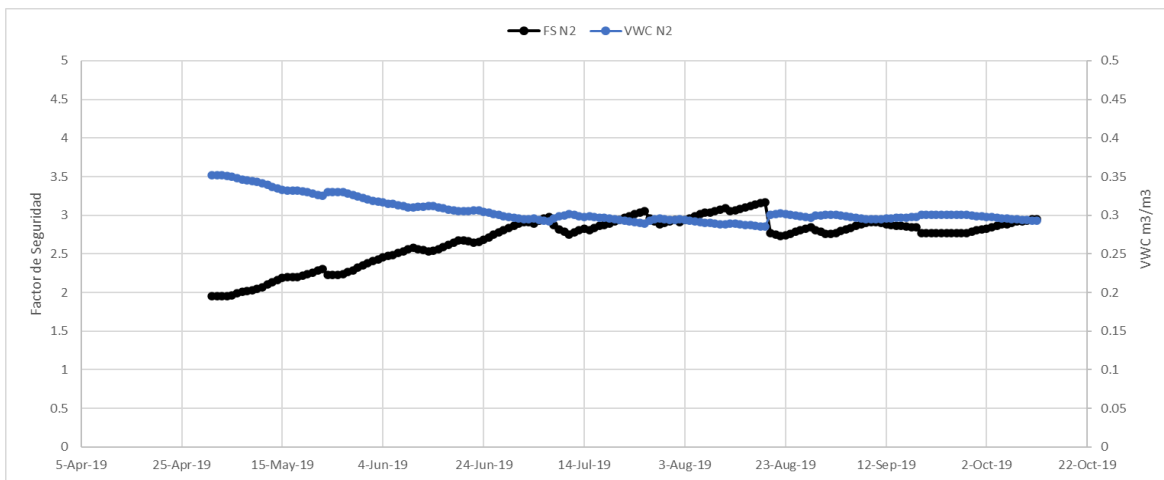


Figura 6.6 Variación de Factor de Seguridad diario por LISFLOOD del nivel 2.

Ya que este cálculo preliminar se ha obtenido estableciendo simplemente las ecuaciones 15, 16 y 17, en la tabla 5 se detallan los valores de los factores de seguridad por los sensores y lo simulado por LISFLOOD seguido de la tabla 6 donde presenta la correlación de Pearson de los factores de seguridad.

Tabla 5: Factor de Seguridad de la ladera de Cercs.

<b>Factor de Seguridad</b>	
FS LISFLOOD Nivel 1	1.07
FS LISFLOOD Nivel 2	1.95
FS 11cm	2.29
FS 23cm	2.68
FS 36cm	3.69

Tabla 6: Correlación de Pearson de los factores de seguridad entre sensores y LISFLOOD en Cercs.

	<b>Correlación de Factor de Seguridad sensores y LISFLOOD</b>		
	FS 11 cm	FS 23 cm	FS 36cm
<b>LISFLOOD Nivel 1</b>	0.23	0.15	-0.03
<b>LISFLOOD Nivel 2</b>	0.69	0.74	0.55

Tal como describe la tabla 5 se llega a tener una comparación de acorde a lo establecido en las figuras 5.12 y 5.13 demostrando que, al presentar mayor contenido de humedad, desfavorece el factor de seguridad.

La tabla 6 detalla los rangos de grado de asociación obtenidas por la correlación de Pearson entre los datos de factores de seguridad por los sensores y lo simulado en la que se determina una relación lineal débil por parte del nivel 1 y los sensores, a diferencia del nivel 2 que muestra una relación lineal moderada y significativa por encima del 50% con las observaciones de campo.

**6.4.2 Factor de Seguridad en Senet**

Para determinar el cálculo de factor de seguridad, al igual que el apartado anterior, se utilizaron parámetros resistentes del terreno obtenidas por Madrid (2012), y características del material en condiciones iniciales las cuales se detallan en la tabla 7.

Tabla 7: Parámetros de los materiales para la curva de retención y parámetros resistentes del terreno.

Parámetros	Variable	Unidad	Condición Inicial
<b>Curva de retención (Modelo Van Genuchten)</b>			
Valor de entrada de aire	$P_o$	[MPa]	0.27
Tensión superficial del agua	$\sigma_o$	[N/m]	0.072
Factor de Forma del modelo Van Genuchten	$\lambda$	[-]	0.35
Valor de contenido volumétrico de agua residual	$\theta_{wr}$	[-]	0.045
Valor de contenido volumétrico de agua máxima	$\theta_{ws}$	[-]	0.264
<b>Parámetros de resistencia del terreno</b>			
Peso específico	$\gamma$	[KN/m3]	18.5
Cohesión	$c'$	Kpa	0
Angulo de Fricción	$\phi'$	°	35

La ecuación de curva de retención propuesta por el modelo de Van Genuchten para esta área de estudio, la asumiremos con parámetros en condiciones iniciales, los cuales dependerán del índice de poro inicial, asociado al estado estructural del suelo y se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{\theta_w - \theta_{wr}}{\theta_{ws} - \theta_{wr}} = \left[ 1 + \left( \frac{S}{P_o} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} ; \quad P_o = ae + b \tag{18}$$

Donde:  $\theta_{wr}$  es el contenido volumétrico de agua residual;  $\theta_{ws}$  contenido volumétrico de agua máxima;  $s$  es la succión;  $\lambda$  y  $P_o$  son parámetros del modelo Van Genuchten,  $e$  índice de poros inicial,  $a$  y  $b$  tienen valores iniciales de -0.25 y 04 respectivamente;  $\theta_w$  es el Contenido volumétrico de agua que varía en función del tiempo, la cual fue obtenida mediante el modelo LISFLOOD.

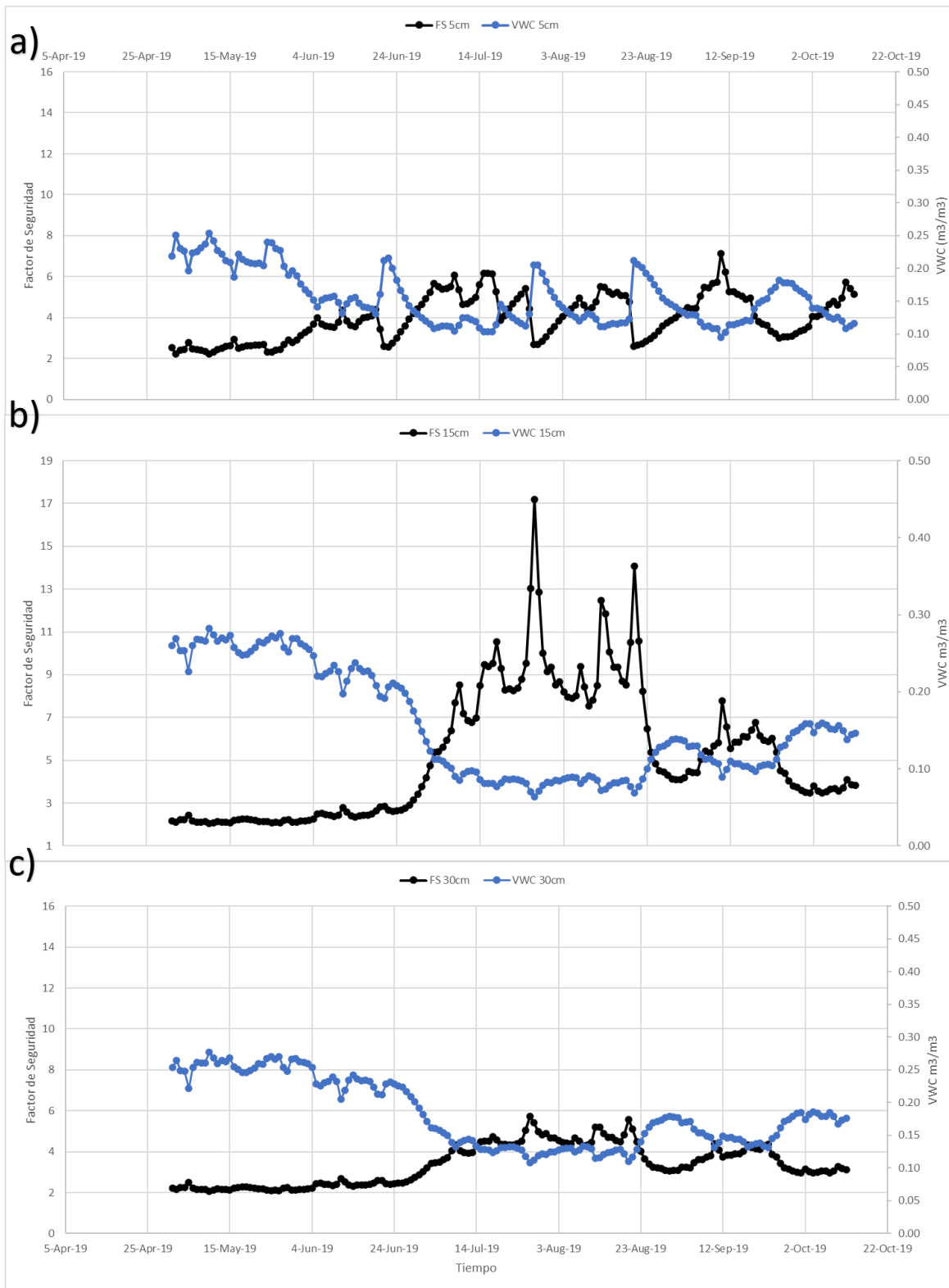


Figura 6.7 Evolución del Factor de seguridad en Senet. a) 5cm de profundidad b) 15 cm de profundidad y c) 30 cm de profundidad.

Sólo se ha incluido la evolución del factor de seguridad para 3 profundidades de la zona con un valor de factor de seguridad descritos en la tabla 8, tal como se muestra en la figura 6.7; Se puede observar la evolución del factor de seguridad en la serie de tiempo establecido, donde el contenido de humedad disminuye en periodo de verano en esta zona, para los sensores de 15 cm y 30 cm.

En la tabla 8 se describen los valores obtenidos del factor de seguridad, como cálculo preliminar de los sensores y por LISFLOOD se ha utilizado solamente las ecuaciones 15, ecuación 16 y ecuación 18, en la que se establecieron parámetros con condiciones iniciales para esta zona.

De igual manera se ha realizado una correlación de Pearson entre los datos de factor de seguridad obtenidas por las 4 profundidades y el factor de seguridad de LISFLOOD, descritas en la tabla 9, donde el nivel 2 presenta una relación lineal significativa, es decir mayor al 71%.

Tabla 8: Factores de seguridad de la ladera de Senet.

Factor de Seguridad	
FS LISFLOOD Nivel 1	1.54
FS LISFLOOD Nivel 2	1.89
FS 5cm	2.22
FS 15cm	2.04
FS 30cm	2.07
FS 50cm	2.43

Tabla 9: Correlación de Pearson de los factores de seguridad entre sensores y LISFLOOD en Senet.

Correlacion de Factor de Seguridad Sensores y LISFLOOD				
Factor de seguridad LISFLOOD	Sensores Factor de Seguridad			
	FS 5cm	FS 15cm	FS 30cm	FS 50cm
FS Nivel 1	0.52	0.23	0.25	0.25
FS Nivel 2	0.71	0.73	0.82	0.80

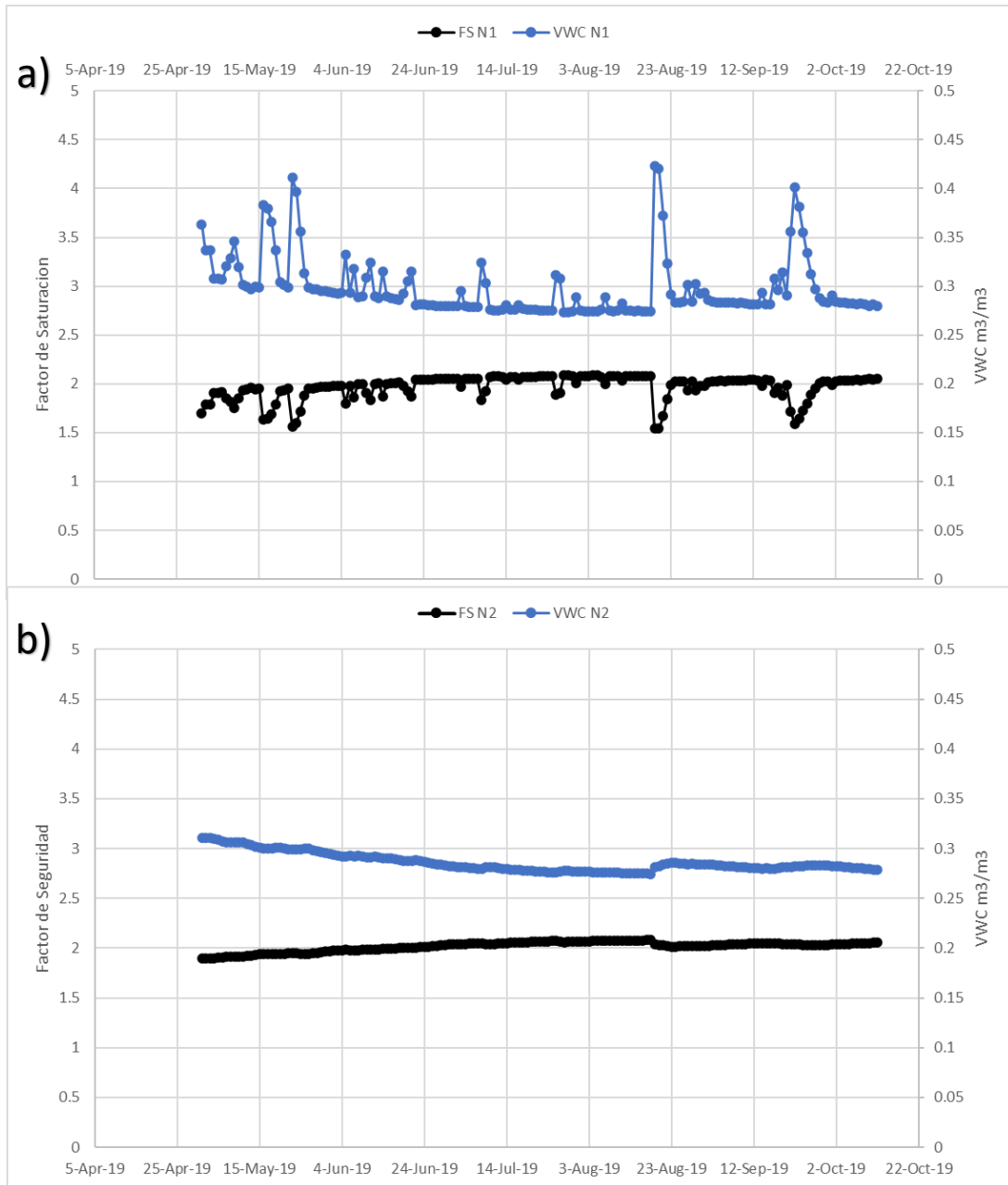


Figura 6.8 Evolución del factor de seguridad en Senet por el modelo LISFLOOD. a) Factor de seguridad Nivel 1. b) Factor de seguridad nivel 2.

En la figura 6.8 se deduce, que al igual que en el apartado anterior, al momento de ocurrir la precipitación, que incrementa el contenido de humedad en el terreno, se produce una disminución de la resistencia al corte y de igual manera el factor de seguridad disminuye. Donde se presenta un factor de seguridad mínimo de 1.54 por el nivel 1 de LISFLOOD y 1.89 por el nivel 2 de LISFLOOD.



## 7 Conclusión y líneas de futuro trabajo

### 7.1 Conclusión

El contenido de humedad del terreno no permanece constante en el tiempo, debido a los cambios de los agentes atmosféricos. Debido a esto, es de vital importancia un monitoreo constante, que nos permitan conocer el grado de saturación presente en el terreno. El volumen de agua almacenada depende de la estructura del terreno presente, lo que determina que se puedan producir erosiones superficiales o internas; es por ello por lo que el agua es considerada un enemigo frente a las estabilidades, al realizarse excavaciones antrópicas.

El uso de pluviómetros, que registran el factor más importante, como la precipitación y los sensores instalados a cierta profundidad, miden el contenido volumétrico de agua (VWC), han permitido su análisis en una serie de tiempo, y eso ha servido de base para observar el incremento diario de VWC en las zonas de estudio y la comparativa con los datos simulados por el modelo LISFLOOD.

Esta evaluación comparativa entre los datos de humedad por las observaciones de campo y el contenido de humedad simulado el modelo LISFLOOD, ha demostrado un alto grado de asociación en las zonas de estudio, se pudo observar que, debido al tipo de terreno presente, el modelo LISFLOOD simula un rango de contenido de humedad mayor, al que es captado por los sensores.

El modelo LISFLOOD genera contenidos volumétricos de agua en 3 niveles, donde el nivel 3 se observó sin variación para las zonas de Agropolis (Figura 5.3), Cercs (Figura 5.11) y Senet (Figura 5.17), por lo que se ha desarrollado, la comparativa en las 3 zonas de estudio, con los 2 niveles de contenido de humedad, simulados por el modelo LISFLOOD y el contenido de humedad registrado por los sensores in situ.

Se observó que el contenido de humedad simulado por LISFLOOD registró la misma variación que registraron los sensores al aumentar la humedad, sin embargo, el modelo registró datos, de contenido de humedad mayor en el terreno y esto indica que el modelo LISFLOOD no elimina suficiente humedad en la capa superior del suelo. Esto se observa en los periodos de verano donde el modelo muestra una falta de secado en suelo desnudo (Figura 5.4 y Figura 5.6), diversas investigaciones definen que es posible que existen errores en las observaciones del modelo, o que también se den errores por el tipo de suelo existente, sin embargo, EFAS que utiliza el modelo para simular los contenidos de humedad, siempre ha presentado mayor índice de humedad en España, norte de África y norte de Europa (Suecia, Noruega y Islandia).

Por lo general el contenido de humedad juega un papel negativo a la hora de evaluar estabildades de las laderas, por ello se realizó un análisis de estabilidad utilizando los datos de contenido de humedad que captan los sensores y el modelo LISFLOOD para observar sus similitudes o rango de diferencias, de igual forma se ha realizado una correlación entre los valores obtenidos para observar su grado de asociación.

Como se ha mencionado anteriormente, un terreno que se encuentre en condiciones saturadas siempre presentara valores en condiciones más desfavorables de inestabilidad.

Para el análisis de estabilidad, se ha utilizado un sondeo realizado en la ladera de Cercs, que describe la ubicación de la superficie de rotura en el estrato de argilita alterada, con cohesión nula y Angulo de fricción de  $15^\circ$ , por esto se ha utilizado los parámetros resistentes de este estrato, pero con características del material del estrato superior, el coluvial, descritos en la tabla 4, la comparación de los resultados obtenidos mediante el contenido de humedad por las observaciones de campo y el modelo LISFLOOD, nos ha mostrado que el terreno al presentar mayor cantidad de agua, el factor de seguridad presenta una condición más desfavorable, el análisis utilizado por el método de talud infinito, han indicado que la ladera se encuentra en un estado estable para el periodo analizado 2019.

Para el análisis de estabilidad en la ladera Senet, se ha impuesto condiciones iniciales como característica del material, y parámetros resistentes como una cohesión nula y Angulo de fricción de  $35^\circ$ , la comparación del análisis de estabilidad, indican que la ubicación de los sensores influirán en su análisis, si se encuentran en la cabecera o el pie de la ladera, de igual forma, tanto por las observaciones en campo y los datos simulados por LISFLOOD se establece que la ladera en Senet, se encuentra en un estado estable, esto a su vez es gracias al gran cantidad de succión que presenta el terreno en el mismo periodo de tiempo.

## **7.2 Líneas de trabajo futuro**

- Ampliar el estudio de análisis comparativo, con datos simulados por el modelo LISFLOOD para años siguientes (2020-2021-2022), en nuevas zonas de Cataluña con observaciones de campo de contenido de humedad.
- Realizar un análisis comparativo, entre los contenidos de humedad de LISFLOOD y otros modelos que simulan el contenido de humedad, con los contenidos de humedad por las observaciones en campo.
- Extender el análisis de estabilidad, utilizando los datos de contenido de humedad simulados por el modelo LISFLOOD, con un modelo de elementos finitos.

## REFERENCIAS

- Askarinejad, A., Casini, F., Bischof, P., Beck, A., Springman, S. M. (2012). Rainfall induced instabilities: a field experiment on a silty sand slope in northern Switzerland. (3), 50-71. Obtenido de [https://www.academia.edu/2498515/Rainfall\\_induced\\_instabilities\\_a\\_field\\_experiment\\_on\\_a\\_silty\\_sand\\_slope\\_in\\_northern\\_Switzerland](https://www.academia.edu/2498515/Rainfall_induced_instabilities_a_field_experiment_on_a_silty_sand_slope_in_northern_Switzerland)
- Bolaño, F. (2008). Anàlisi d'inestabilitats en dipòsits glacials als barrancs de la Baixada i 'Esbornada de Senet (Alta Ribagorça, Pirineu central). 2-8.
- De Oña, J., Ferrer, A., Osorio, F. (2011). Erosion and vegetation cover in road slopes hydroseeded with sewage sludge. *16*(6), 465-468. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.04.002>
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for unsaturated soils*. John Wiley and Sons.
- Genuchten, V. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *44*(5), 892-898. Obtenido de [https://scholar.google.com.pa/scholar?q=A+Closedform+Equation+for+Predicting+the+Hydraulic+Conductivity+of+Unsaturated+Soils.&hl=es&as\\_sdt=0&as\\_vis=1&oi=scholart](https://scholar.google.com.pa/scholar?q=A+Closedform+Equation+for+Predicting+the+Hydraulic+Conductivity+of+Unsaturated+Soils.&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart)
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación.
- Gray, D. H., Sotir, R. (1996). *BIOTECHNICAL AND SOIL BIOENGINEERING SLOPE STABILIZATION*. New York: John Wiley & Sons. Obtenido de [https://scholar.google.com.pa/scholar?q=Biotechnical+And+Soil+Bioengineering+Slope+Stabilization&hl=es&as\\_sdt=0&as\\_vis=1&oi=scholart](https://scholar.google.com.pa/scholar?q=Biotechnical+And+Soil+Bioengineering+Slope+Stabilization&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart)
- Guachizaca, V. (2018). *Análisis de las interacciones suelo-vegetación-atmósfera en un talud experimental*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/119681?locale-attribute=es>
- Hürlimann, M., Abanco, C., Moya, J. (2011). *Experiences of debris-flow monitoring and warning at catchment scale in the Pyrenees, Second World Landslide Forum*.
- ISMN. (2022). *International Soil Moisture Network*. Obtenido de <https://ismn.geo.tuwien.ac.at/en/>
- Lawrence, H., de Rosnaay, P., Baugh, C. (2019). *ECMWF report: First steps towards using SMOS soil moisture in the European Flood Awareness System*. Obtenido de <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2020/19535-first-steps-towards-using-smos-soil-moisture-european-flood-awareness-system.pdf>
- Lu, N., Likos, W. J. (2004). *Unsaturated soil mechanics*. New Jersey, United States: John Wiley and Sons.
- Madrid, I. (2012). *Monitoreo de la humedad y de las presiones intersticiales en un depósito de origen glaciar y su efecto en la formación de roturas superficiales. Aplicación en un till en Senet*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/16329>
- Mamani, A. (2019). *Análisis geotécnico de un deslizamiento superficial en Cercs (Prépirineo Catalán)*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/169296>

## REFERENCIA

---

- Oorthuis Gómez, R. (2016). *Diseño de un experimento a gran escala para estudiar el efecto de las interacciones suelo-vegetación-atmósfera en laderas*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/90737>
- Oorthuis, R., Hürlimann, M., Fraccica, A., Lloret, A., Moya, J., Puig-Polo, C., Vaunat, J. (2018). *Monitoring of a Full-Scale Embankment Experiment Regarding Soil–Vegetation–Atmosphere Interactions*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/6/688>
- Osiński, P., Koda, E. (2016). *Site Investigation of an Industrial Landfill for the Purpose of a Remedial Works Project*. Chicago, Illinois. Obtenido de <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784480168.073>
- Robock, A., Vinnikov, K., Srinivasan, G., Entin, J., Hollinger, S., Speranskaya, N. (2000). The Global Soil Moisture Data Bank. *81(6)*, 1281-1300. Obtenido de [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<1281:TGSMDB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<1281:TGSMDB>2.3.CO;2)
- Rodríguez, N., Muñoz, J., Richaume, P., de Rosnay, P., Kerr, Y., Drusch, M., Mecklenburg, S. (2017). SMOS near-real-time soil moisture product: processor overview and first validation results. *21(10)*. Obtenido de <https://hess.copernicus.org/articles/21/5201/2017/>
- Romero, E., Della Vecchia, G., Jommi, C. (2011). An insight into the water retention properties of compacted clayey soils. *Géotechnique*, *61(4)*, 313-328. Obtenido de <https://doi.org/10.1680/geot.2011.61.4.313>
- Roo de, A., Burek, P., Van der Knijff, J. (2013). *LISFLOOD, distributed water balance and flood simulation model*. Obtenido de <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC78917>
- Roo de, A., Burek, P., Zambrano, M., Van der Knijff, J. (2012). *Hydrological modelling at continental scale: The LISFLOOD model*. Obtenido de [http://www.crahi.upc.edu/imprints/course/images/stories/pdf/imprints\\_pdfs/presentations/2012\\_09\\_LISFLOOD.pdf](http://www.crahi.upc.edu/imprints/course/images/stories/pdf/imprints_pdfs/presentations/2012_09_LISFLOOD.pdf)
- Serna, M. (2019). *Análisis Morfológico de alta resolución en una cuenca torrencial. Aplicación de dron y fotogrametría digital en el barranco el Rebaixader (Pirineo Central)*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/170828>
- Tang, T., Shindell, D., Samset, B. H., Boucher, O., Forster, P. M., Myhre, G. (2018). Dynamical response of Mediterranean precipitation to greenhouse gases and aerosols. *18(11)*, 8439-8452. Obtenido de <https://acp.copernicus.org/articles/18/8439/2018/>
- Terzaghi, K. (1936). *The shear strength of saturated soils*. En *Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.(Cambridge, MA) (Vol.1, pp 54-56)*.
- Wetterhall, F. (2021). *Cálculo del Índice de humedad del suelo*. Obtenido de <https://confluence.ecmwf.int/display/COPSRV/Soil+wetness+index+calculation>
- Zhao, Q., Zhang, Y., Xu, S., Ji, X., Wang, S. (2019). Relationships between Riparian Vegetation Pattern and the Hydraulic Characteristics of Upslope Runoff. *11(10)*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/10/2966>

**Anexo 1 La succión, a partir de la ecuación curva de retención, para determinar la tensión de succión.**

Ecuación de succión utilizada para determinar la tensión de succión (ecuación 15) necesaria para coeficiente de seguridad (ecuación 16), desde la ecuación de curva de retención (ecuación 17 y 18). Para las 2 zonas de estudio analizadas: Cercs y Senet.

$$\frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left[ 1 + \left( \frac{S}{P_o} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda}$$

$$\ln \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \ln \left[ 1 + \left( \frac{S}{P_o} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda}$$

$$\ln \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = -\lambda \ln \left[ 1 + \left( \frac{S}{P_o} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]$$

$$\ln \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = -\cancel{\lambda} \ln 1 - \lambda \ln \left( \frac{S}{P_o} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}}$$

$$\ln \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = -\lambda \left[ \frac{1}{1-\lambda} \ln \left( \frac{S}{P_o} \right) \right]$$

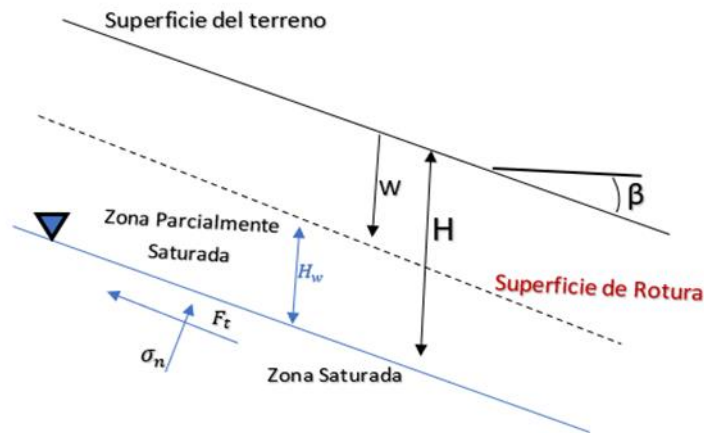
$$\left(\frac{\lambda - 1}{\lambda}\right) \left(\ln \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}}\right) = \ln \left(\frac{S}{P_0}\right)$$

$$\left(\ln \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}}\right)^{\frac{\lambda-1}{\lambda}} = \ln \left(\frac{S}{P_0}\right)$$

$$e^{\ln \left(\frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}}\right)^{\frac{\lambda-1}{\lambda}}} = e^{\ln \left(\frac{S}{P_0}\right)}$$

$$S = P_0 \left(\frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}}\right)^{\frac{\lambda-1}{\lambda}}$$

**Anexo 2 Equilibrio de fuerzas para determinar la ecuación de Coeficiente de seguridad mediante el método de talud infinito.**



$$- \sum F_x = 0$$

$$W \sin \beta - F_t = 0$$

$$F_t = W \sin \beta$$

$$- FS = \frac{\tau_{resist.}}{\tau_{movi.}} = \frac{\sigma_n \tan \phi}{F_t}$$

$$- FS = \frac{c' + (W \cos \beta - P_w) \tan \phi}{W \sin \beta}$$

$$- \sum F_y = 0$$

$$\sigma_n + P_w - W \cos \beta = 0$$

$$\sigma_n = W \cos \beta - P_w$$

$$FS = \frac{c' + (\gamma H \cos^2 \beta - \sigma^s) \tan \phi}{\gamma H \sin \beta \cos \beta}$$

$$- W = \gamma * Vol$$

$$W = \gamma H \cos \beta$$