

# Análisis de flujos hidrodinámicos bidimensionales en superficies de los taludes del trópico

## Analysis of two-dimensional hydrodynamic flows on tropic slope surfaces

Ronald Andrés Rodríguez-Poltronieri<sup>1</sup>, David Borge-Leandro<sup>2</sup>

---


*Fecha de recepción: 16 de agosto, 2022*

*Fecha de aprobación: 29 de octubre, 2022*


Rodríguez-Poltronieri, R.A; Borge-Leandro, D. Análisis de flujos hidrodinámicos bidimensionales en superficies de los taludes del trópico. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 76-93.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6365>

1 Universidad Fidélitas. Costa Rica. Correo electrónico: [rpoltro2310@gmail.com](mailto:rpoltro2310@gmail.com)

 <https://orcid.org/0000-0002-7275-5977>

2 Universidad Fidélitas. Costa Rica. Correo electrónico: [dborge80034@ufide.ac.cr](mailto:dborge80034@ufide.ac.cr)

 <https://orcid.org/0000-0001-9157-8438>

## Palabras clave

Hidrodinámica; escorrentía superficial; erosión; cambio climático; taludes; vegetación nativa.

## Resumen

Pocos estudios reflejan los comportamientos hidrodinámicos de los flujos superficiales en taludes del trópico, a pesar de la cantidad de herramientas de modelación con las que se cuenta en la actualidad. La presente investigación es un aporte que ayuda a incrementar los conocimientos de la dinámica de las escorrentías en los taludes, como un estudio extra de los comportamientos de las precipitaciones sobre estos. Los análisis realizados toman relevancia dentro de los estudios básicos de un proyecto, desarrollándose dentro de las disciplinas de hidrodinámica, geología y ambiental.

El caso estudiado se ubica en un talud del sector de Cervantes, el cual ya fue intervenido con una malla de acero de doble refuerzo como un control erosivo superficial. Con la investigación se realiza una comparativa de obras aplicadas y una nueva propuesta sostenible mediante herramientas de modelación bidimensional.

Los modelos reflejan el comportamiento de las velocidades de flujo en general y puntual debido a la distribución en un talud, se realizó una comparación de sus velocidades de flujo en tres escenarios, teniendo una disminución de 33,73% hasta 48,88% en las velocidades de flujo de la cobertura propuesta, tanto para eventos de periodo de retorno de 50 y 100 años. Además se analizó un efecto de cambio climático, que verifica que las velocidades no superen los límites de arrastre teóricos de finos para el modelo propuesto y en cuyo caso se cumplió a cabalidad. Como control de escorrentía, la cobertura propuesta cumple su función, sin embargo por las condiciones particulares del talud analizado la propuesta se desempeña como un complemento de las medidas aplicadas.

## Keywords

Hydrodynamics; surface runoff; erosion; climate change; slopes; native vegetation.

## Abstract

Few studies reflect the hydrodynamic behavior of surface flows on slopes of the tropics, despite the number of modeling tools currently available. The present investigation is a contribution that helps to increase the knowledge of the dynamics of the runoff on the slopes, as an extra study of the behavior of the precipitations on these. The analyzes carried out take relevance within the basic studies of a project, developing within the disciplines of hydrodynamics, geology and environment.

The case studied is found on a slope in the Cervantes sector, which has already been intervened with a double-reinforced steel mesh as a superficial erosive control. With the research, a comparison of applied works and a new sustainable proposal are made using bidimensional modeling tools.

The models reflect the behavior of the flow velocities in general and specific due to the distribution on a slope, a comparison of their flow velocities was made in three scenarios, having a decrease of 33.73% to 48.88% in the flow velocities of the proposed coverage, both for events with a return period of 50 and 100 years. In addition, a climate change effect was analyzed, which verified that the flow speeds do not exceed the theoretical drag limits for the proposed

model and in which case it was fully complied with. As runoff control, the proposed coverage fulfills its function. However, due to the particular conditions of the analyzed slope, the proposal works as a complement to the applied measures.

## Introducción

La modelación hidrodinámica es una herramienta útil para identificar el comportamiento de las escorrentías superficiales, producto de las precipitaciones. Estos modelos tienen muchas aplicaciones para determinar llanuras de inundación, así como para determinar flujos en canales y puentes, el trabajo toma los principios de la hidrodinámica y los aplica en taludes con problemas de erosión superficial; como indica [1] los modelos computacionales tanto numéricos como gráficos, contribuyen como herramienta de análisis y predicción de condiciones del entorno, para la toma de decisiones y solución de problemas de ingeniería.

La zona norte de Cartago es un sitio con suelos de características erosivas, como indica [2] los suelos de este sector debido a condiciones topográficas, al sobre uso generalizado y frecuentes lluvias de alta intensidad, se ven afectados y desgastados. Por lo que es usual que sus superficies tiendan al desgaste y la exposición de otros estratos inferiores. Dichas condiciones de los suelos de la zona se presentan en un talud de Cervantes de Cartago, camino a la casa de máquinas de la planta hidroeléctrica Birrís, donde encontramos un talud ya intervenido por una malla de acero reforzado MINAX, diseñada por la empresa GEOBRUGG.

El control erosivo funciona como una opción viable, sin embargo la investigación comprobó las condiciones del talud antes de la intervención, las actuales y las probables, con un modelo de control erosivo sostenible. La opción seleccionada de sistema de control erosivo es la revegetación del sitio, ya que como menciona [3], los efectos hidrológicos de la vegetación sobre los taludes colaboran modificando aspectos como la rapidez del flujo por la aspereza, la función de infiltración y evapotranspiración. Las condiciones anteriores están ligadas al tipo de vegetación que se implemente en la zona y el espécimen específico. La selección debe no solo disminuir la erosión del talud, sino además proteger las condiciones medio ambientales del sitio. Para ello se basa la escogencia de la especie vegetal, en los aspectos bioclimáticos del sitio, [4]; tomó la influencia de condiciones edafológicas, climatológicas y biológicas, de esta manera produciendo correlaciones de la fisonomía de una zona con otra, para así asociar las especies vegetales y poder hacer uso de ellas sin perjudicar los micro climas; manteniendo el equilibrio de las condiciones en suelos foráneos.

Con base en la clasificación de zonas biológicas del país, [5] determinó una guía de estabilización de taludes en los suelos de Costa Rica utilizando vegetación nativa; implementando fichas técnicas del INBio para así definir cada espécimen empleando parámetros de altitud y temperatura, por lo que se tienen un rango amplio de especímenes de vegetación para control erosivo.

## Basado en las clasificaciones

El análisis propuesto estudió los comportamientos del flujo de escorrentía, haciendo una comparativa con velocidades permisibles, aunado a esto se plantean tres escenarios comparativos la condición sin intervención (escenario 1), la aplicación de la malla MINAX por GEOBRUGG (escenario 2), la aplicación de vegetación nativa como propuesta (escenario 3) y un escenario bajo efectos de cambio climático (escenario 4) que verifica si la propuesta resiste eventos de este tipo. Es importante estudiar las velocidades de flujo para cada escenario, ya que determinan si existe o no arrastre y cuál de todos ellos es el más óptimo. Para cada modelo se determina la rugosidad a implementar estudiando los usos de suelo y/o la cobertura de la superficie que se está trabajando.

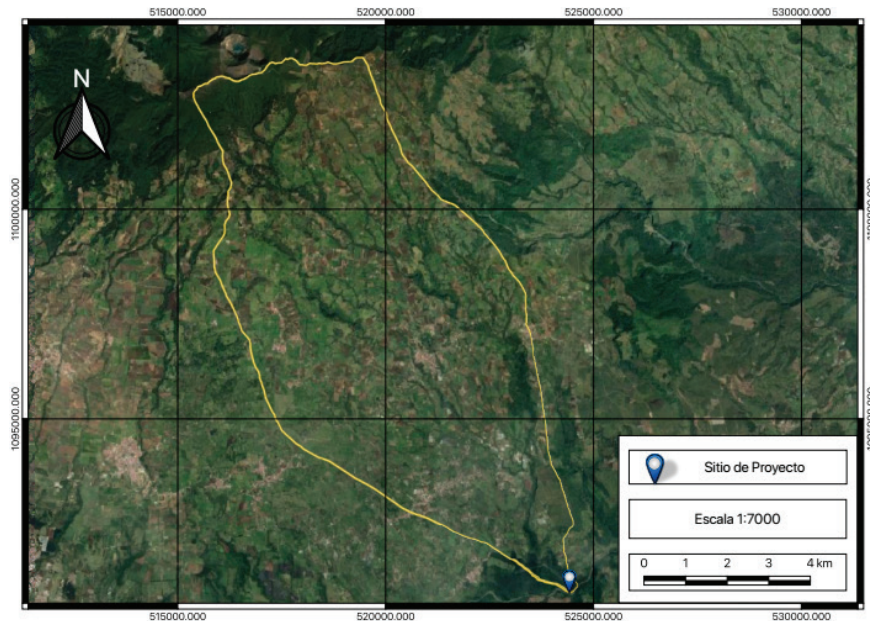
Las precipitaciones de análisis para la investigación, surgen de datos suministrados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y se estiman por métodos estadísticos de Gumbel y el test de Kolmogorov-Smirnov, empleados por la misma institución para determinar las precipitaciones máximas para los periodos de retorno de 50 y 100 años, las intensidades para las curvas de intensidad duración y frecuencia emplean el método Dick Peschke mencionado por [6] para su cálculo.

La importancia de los modelos hidrodinámicos como menciona [7] explica como este modelo numérico permite obtener conocimientos puntuales sobre los comportamientos del flujo del agua, generando representaciones espaciales para la solución de problemas con respecto al recurso hídrico, es esta herramienta una necesidad para la preservación del medio ambiente y el desarrollo económico, lo que permite tener un alto rango de precisión con respecto a la dimensión del problema que se desea abarcar y por ende, permite obtener o idear soluciones más precisas.

El objetivo general para este informe fue; Analizar un talud por medio de modelos hidrodinámicos bidimensionales para emplear controles erosivos con vegetación nativa en Santiago de Cervantes, Cartago. Como objetivos específicos se tienen; (1) Contrastar los efectos de las medidas aplicadas en el talud contra la condición expuesta del mismo, por medio de modelos hidrodinámicos de flujo de escorrentía para periodos de retorno de 50 y 100 años; (2) evaluar la diferencia de los flujos de escorrentía entre las medidas empleadas en el talud y la aplicación de vegetación nativa como control erosivo sostenible para periodos de retorno de 50 y 100 años; (3) verificar el comportamiento del sistema de control erosivo sostenible ante un evento de cambio climático.

## **Materiales y métodos**

El sitio se encuentra cerca de la desembocadura del río Birrís, carretera a la planta hidroeléctrica con el mismo nombre, dicha cuenca pertenece a la vertiente norte del río Reventazón que nace en el parque nacional Volcán Irazú, el cuerpo de agua recorre los cantones de Oreamuno Y Alvarado. Según [8], las actividades agrícolas y ganaderas han generado la degradación y facilidad erosiva de los suelos de la zona, siendo esta subcuenca la contribuyente del 16% de los sedimentos de la cuenca del río Reventazón a pesar de ser solo el 5% de la superficie de esta.



**Figura 1.** Cuenca del Río Birris y ubicación del proyecto.

La investigación se desarrolla dentro del paradigma científico, enfocando parte de esta en los tipos aplicada científica y cuantitativa, se desarrollan los conocimientos teóricos de ramas como la ingeniería ambiental, geotecnia, hidrología e hidrodinámica. Debido a las condiciones del trabajo el alcance es del tipo correlacional, comparando velocidades y asperezas en la superficie estudiada y correlacionando los datos obtenidos con parámetros teóricos de erosión por usos de suelos.

Las fuentes primarias de información son los mapeos por medio de aeronaves no tripuladas y levantamientos con LIDAR, los cuales permiten tener un archivo de modelo de elevación digital para analizar flujos con un nivel de exactitud mayor. Este levantamiento es clave para determinar la red de drenajes del talud, la pendiente, inclinación, así como los posibles caminos de recorrido de las precipitaciones en el talud, la herramienta Global Mapper permite trabajar con estos archivos y determinar las características antes mencionadas. Además con esta herramienta se estudia características similares para la cuenca en general, obteniendo parámetros de pendiente, hipsometría, densidad de drenajes y compacidad que para efectos de la investigación permite obtener datos iniciales sobre el comportamiento erosivo a nivel macro. Como parte de los insumos se contrataron ensayos de suelos a nivel superficial en el laboratorio de suelos de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, que determinan las propiedades físicas y de capacidad hidráulica del talud.



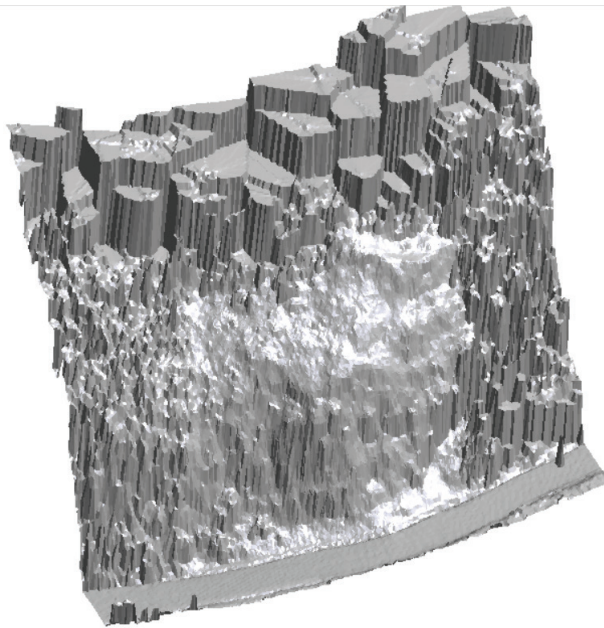
**Figura 2.** Muestreo de suelos para ensayos de propiedades físicas y de conducción hidráulica.

Después de trazar la cuenca del río Birrís se determina por medio de las estaciones de lluvia del IMN en el Atlas 2014 los polígonos de Voronoi para la superficie estudiada. Para ello se emplea la herramienta QGis y se observa que hay dos posibles estaciones de las cuales se pueden obtener intensidades de análisis. Con dicha información se solicitó al IMN los datos de la estación de lluvia de 73-115 Capellades Birrís; ya que, dicha estación es la que afecta directamente el proyecto. Para determinar las intensidades de lluvia se emplea el método de Gumbel para las precipitaciones máximas diarias de los últimos 11 años, la herramienta Hydrognomon calcula una curva logarítmica de probabilidad de eventos de precipitación para diversos periodos de retorno con un nivel de excedencia entre los 8% y 93%, la prueba de bondad de Kolmogorov- Smirnov determina el método de mejor ajuste con un nivel de aceptación de un 5%, en el que Gumbel cumple a cabalidad. El método de Gumbel permite obtener precipitaciones diarias máximas para diversos periodos de retorno y con el método de Dick Peschke se determinan finalmente las intensidades de lluvia para diferentes duraciones de tormenta y periodos de retorno.

Las intensidades sirven para calcular los hidrogramas unitario sintéticos triangulares del SCS, cuyos caudales son parámetros de entrada en los modelos hidrodinámicos bidimensionales. Las intensidades se verán afectadas por la capacidad de infiltración de los suelos, basados en los resultados del muestreo de campo la condición de conducción hidráulica saturada para un suelo de 53% de saturación, por lo que se contempla una capacidad de absorción del suelo de 47%, esto disminuye la escorrentía producto de las intensidades calculadas.

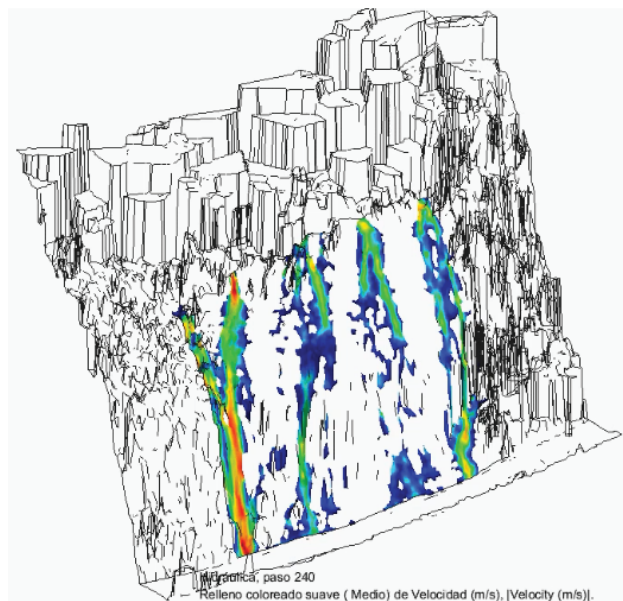
La metodología final implica el uso de la herramienta Iber 2.4.3 para el modelo hidrodinámico de las escorrentías en el talud, primero se determina los escenarios que se van a modelar, se necesita la rugosidad del suelo antes de ser intervenido, la rugosidad del suelo una vez aplicadas las medidas de control de escorrentía de la malla MINAX y la rugosidad de la propuesta de control de erosión sostenible; finalmente se desea verificar este modelo propuesto para un evento de cambio climático. Los primeros tres escenarios se corren empleando un caudal de periodos de retorno de 50 y 100 años con la capacidad de los suelos al 53% de saturación, mientras el modelo de cambio climático se trabaja con suelos saturados al 100% por lo que las escorrentías aumentan para el último caso.

Se aplica a la superficie del talud una malla RTIN en la herramienta IBER 2.4.3 con triángulos de 30 cm, esto permite una mayor exactitud en el flujo, seguidamente se le da elevación al mallado para tener una vista de 3 dimensiones del talud como se aprecia en la figura 3.



**Figura 3.** Modelo de elevación digital.

Finalmente la investigación adquiere un enfoque alternativo entre lo cuantitativo y cualitativo, ya que viene de lo general a lo específico recolectando datos, pero con la necesidad de interpretación de estos con criterio ingenieril. Definiendo por medio de las áreas de colores suavizadas, las velocidades críticas y la duración de las mismas; para así, realizar una comparativa contra velocidades teóricas y definir si existe o no erosión superficial para cada escenario.



**Figura 4.** Modelo con áreas de colores suavizada.

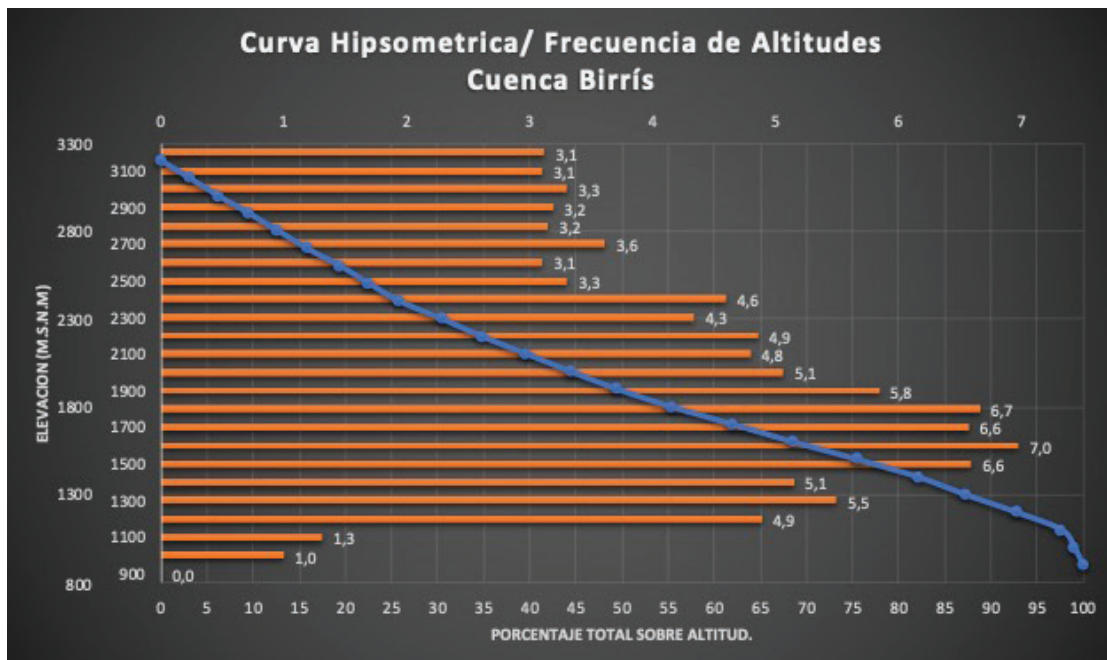
## Resultados

### Morfometría de la Cuenca

Se determinaron parámetros morfométricos para analizar la capacidad erosiva de la cuenca y así obtener las capacidades del suelo y susceptibilidad a la erosión, como datos iniciales, previo a una investigación más específica. Dentro de los parámetros de forma se obtuvieron los siguientes:

**Cuadro 1.** Características y Parámetros de la cuenca.

Área (km <sup>2</sup> )	63,8
Perímetro (km)	36
Índice de compacidad	1,26
Altura (m)	2370
Longitud (m)	20530
Pendiente (m/m)	0,12
Longitud de Streams (km)	465,225
Densidad Drenajes (km/km <sup>2</sup> )	7,29



**Figura 4.** Curva Hipsométrica de la cuenca.

La cuenca tiene forma oval u oblonga según indica el índice de compacidad, se cuenta con un criterio moderado de concentración de volúmenes de escorrentía. Se tiene una pendiente promedio del 12%, con una destacada sinuosidad en pequeños tramos producto del desarrollo humano de la zona.

La densidad de drenajes es alta para el tipo de cuenca y su tamaño, esto refleja que los flujos de escorrentía pueden ser rápidos, estando en presencia de suelos erosivos o impermeables.



La curva hipsométrica indica una etapa de madurez, por lo que se tiene gran arrastre y depósito de sedimentos, esto explica el gran aporte de sedimentos que realiza al río Reventazón.

### Morfometría del Sitio

El sitio de estudio ubica un talud con varias características; se compone de un conglomerado de suelo y roca, este ya cuenta con intervención de malla de acero de doble refuerzo, con funciones de control de erosión y retención. Dentro de los parámetros que se destacan para el sitio se tienen los siguientes:

**Cuadro 2.** Características y Parámetros de la cuenca.

Área (m <sup>2</sup> )	360
Perímetro (m)	80,3
Cota Máxima (m)	902,5
Cota Mínima (m)	872
Long Talud (m)	28,10
Pendiente Promedio (m/m)	1,78
Angulo de inclinación (°)	60,68
Pendiente Promedio de Streams (m)	29,24

Los parámetros del talud en cuestión, funcionan como parámetros de entrada para otros cálculos en la investigación. El cálculo de hidrogramas se realiza gracias al área de la zona, las cotas mínima y máxima permiten determinar la altura por donde recorre el agua. La pendiente promedio de los streams, colabora en el mismo cálculo, ya que nos da el recorrido de gota sobre la superficie del talud.

La pendiente del talud, así como su inclinación nos permite tener noción de que tipo de cobertura vegetal se puede implementar, los pastos son vegetaciones que soportan pendientes bastante altas, como las que refleja el sitio.

### Tipo de Suelo

Según los estudios realizados, se tiene un suelo con textura tipo franco arcilloso arenoso. Las muestras tomadas se realizaron a 15 cm por debajo de la capa orgánica, dichas muestras funcionan como base para determinar la rugosidad del primer y segundo escenario. Además de contribuir a la disminución de precipitaciones dada su característica porosa y permeable, dato analizado según su humedad y conductividad hidráulica saturada.

El talud presenta una textura de material del tipo franco arcilloso arenoso con 56 % de arena, 23 % limo y 22 % arcilla y del porcentaje de arenas se tiene 21 % de arena gruesa, 16 % arena media, 10 % arena fina y 9 % arena muy fina [9].

**Cuadro 3.** Límites de Atterberg suelo franco arcilloso arenoso.

Límites de Atterberg	% g/g
Límite Plástico, LP	63,3 ± 1,14
Límite Líquido, LL	71,2
Índice de plasticidad, IP	7,9

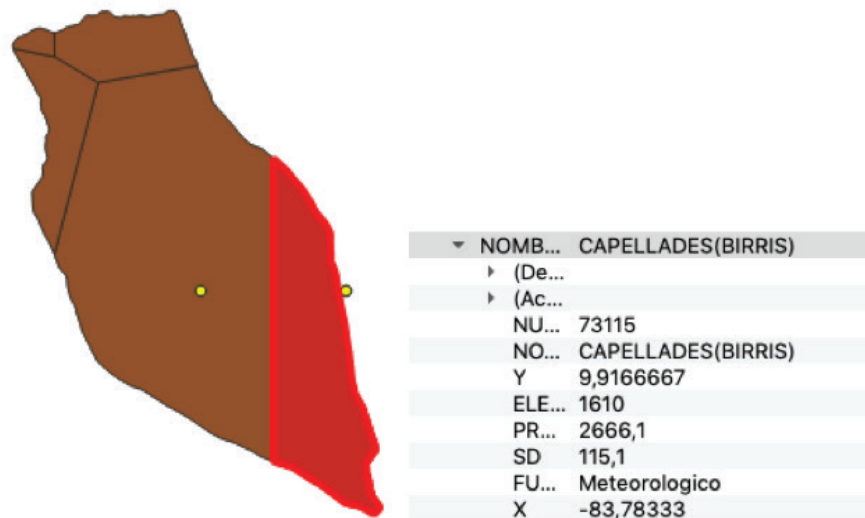
**Cuadro 4.** Densidad aparente y contenido de humedad de la muestra.

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad Aparente	0,73	g/cm <sup>3</sup>
Porosidad Total	72	%
Humedad Gravimétrica	53	%
Humedad Volumétrica	38	%
Conductividad Hidráulica Saturada	49,05	cm/h

Fuente: [9].

### Caudales de Análisis

La estación del Instituto Meteorológico Nacional que afecta el sitio de estudio según los polígonos de Voronoi de la cuenca corresponde a la estación de lluvia Capellades Birris.



**Figura 5.** Estación de lluvia del sitio en estudio, por Polígonos de Voronoi.

Por su parte los datos obtenidos de la estación de lluvia se clasificaron para obtener la máxima precipitación anual, la distribución logarítmica de Gumbel, fue la que mejor se adaptó a los datos suministrados. Los datos se encuentran dentro del nivel de aceptación del test de Kolmogorov-Smirnov, además de cumplir el valor de confianza en un 95%.

**Cuadro 5.** Intensidades de lluvia en mm/h para análisis.

Duración (min)	Periodos de Retorno (años)						
	5	10	25	50	100	250	500
5	333,20	372,04	421,12	457,53	493,67	541,25	577,18
10	198,12	221,22	250,40	272,05	293,54	321,83	343,19
15	146,17	163,21	184,74	200,71	216,57	237,44	253,20
30	86,92	97,05	109,85	119,35	128,77	141,18	150,56
60	51,68	57,70	65,32	70,96	76,57	83,95	89,52
120	30,73	34,31	38,84	42,19	45,53	49,92	53,23

Los caudales de análisis son el resultado de hidrogramas sintéticos, [10] los describe como una conformación de hidrogramas unitarios de diversos puntos dentro del área de drenaje o cuenca, que tiene como respuesta un caudal en un punto específico a partir de la información de lluvia.

Gráficamente se puede visualizar otros aspectos del comportamiento de las escorrentías, por medio de los hidrogramas unitarios triangulares; estos fueron desarrollado por Mockus y utilizados por SCS (Soil Conservation Service), el cual representa gráficamente valores como caudal punta, tiempo base, el tiempo punta en el que desarrolla dicho caudal, además tiempo de retraso y de concentración [11].

Para los periodos de retorno de análisis de 50 y 100 años con una duración de tormenta de 30 minutos, se tienen intensidades de precipitación de 119,35 y 128,77 respectivamente y para la intensidad bajo efecto de cambio climático se toma un incremento del 18% de la intensidad para el periodo de 100 años, lo cual representa un 151,94 .

Para efectos de cálculo de los hidrogramas y sus respectivos caudales se establece que por efectos de la permeabilidad encontrada en los suelos se debe reducir sus precipitaciones en un 47% por lo que para los periodos de retorno de 50 y 100 años tenemos 63,26 y 68,25 respectivamente, para la intensidad de cambio climático se mantiene la misma precipitación simulando la condición más crítica que puede presentar el sitio.

**Cuadro 6.** Caudales de análisis para los diferentes Periodos de Retorno.

Periodo de Retorno (años)	Intensidad (mm/h)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
50	63,26	0,0556
100	68,25	0,06
100 + 18%	151,94	0,1335

## Vegetación

La intercepción de las gotas de lluvia depende de la intensidad de la precipitación y el tipo de vegetación, esto impide el impacto directo sobre el suelo, derivando otros efectos como la retención del agua en el follaje, evapotranspiración por absorción, disminución del flujo por acumulación, drenaje por el follaje, goteo y aumento de infiltración [12].

Para obtener una vegetación para el sitio se tomaron en cuenta características del entorno del sector. Por el tipo de inclinación se definió pasto como la vegetación apta debido a su topografía, para definir que tipo de pasto no afectaría el micro clima de la zona se implementaron las zonas de vida de Holdridge. Usando la precipitación anual de la zona que indicaba la estación de lluvia y tomando en cuenta la altitud del sitio, se llegó a obtener dos posibles zonas de vida, para las cuales el espécimen Pennisetum Purpureum (Pasto Elefante) coincidía en ambas zonas.

**Cuadro 7.** Zonas de vida de Holdridge del sitio.

Código	Descripción	Temperatura en (C°)	Altitud (msnm)
Bp-MB	Bosque pluvial montano bajo	Entre 18 y 12	400-2800
Bmh-P	Bosque muy húmedo premontano	Entre 24 y 18	0-2000

## Rugosidad

El análisis se define por medio de escenarios de diferentes rugosidades, éstas fueron definidas a partir de las condiciones del suelo, en cada estado del talud. Las rugosidades son producto de correlaciones para los suelos clasificados y las coberturas vegetales propuestas. Como indica [13], los coeficientes de rugosidad de Manning funcionan para diferentes tipos de canales con y sin mantenimiento, como un dato de diseño y análisis de las superficies por donde fluye agua. Este coeficiente es parámetro de entrada para los modelos en cada escenario.

**Cuadro 8.** Rugosidades por escenarios.

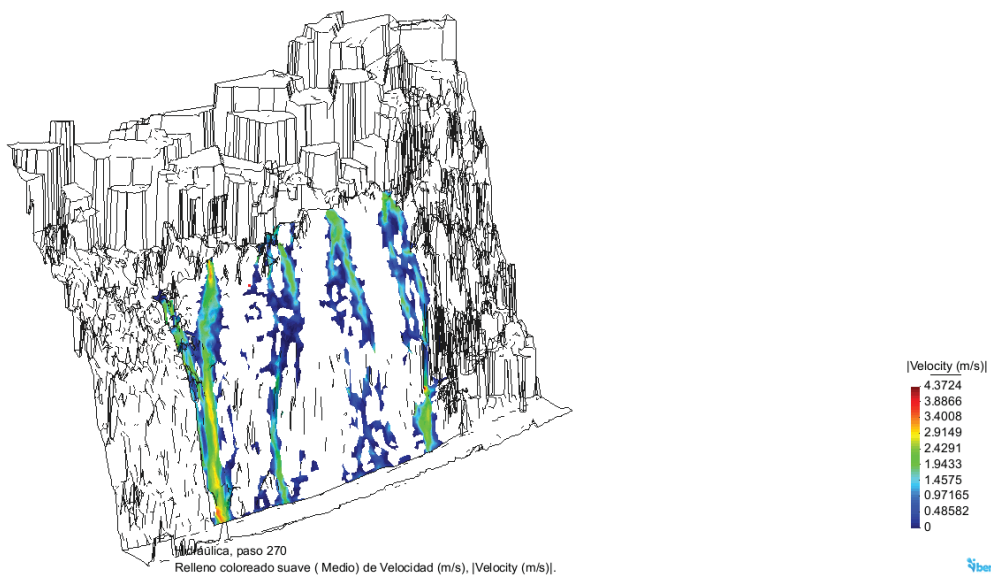
Escenario	Descripción	T (años)	Rugosidad (manning)
1	Suelo Franco arcilloso arenoso	50, 100	0,023
2	Suelo desnudo (malla acero)	50, 100	0,03
3	Cobertura vegetal media	50, 100	0,08
4	Cobertura vegetal densa	100 + 18%	0,12

## Modelos hidrodinámicos de flujo de escorrentía superficial

A continuación se presentan las velocidades críticas observadas para cada escenario y la velocidad de arrastre límite.

**Cuadro 9.** Velocidades críticas escenario 1.

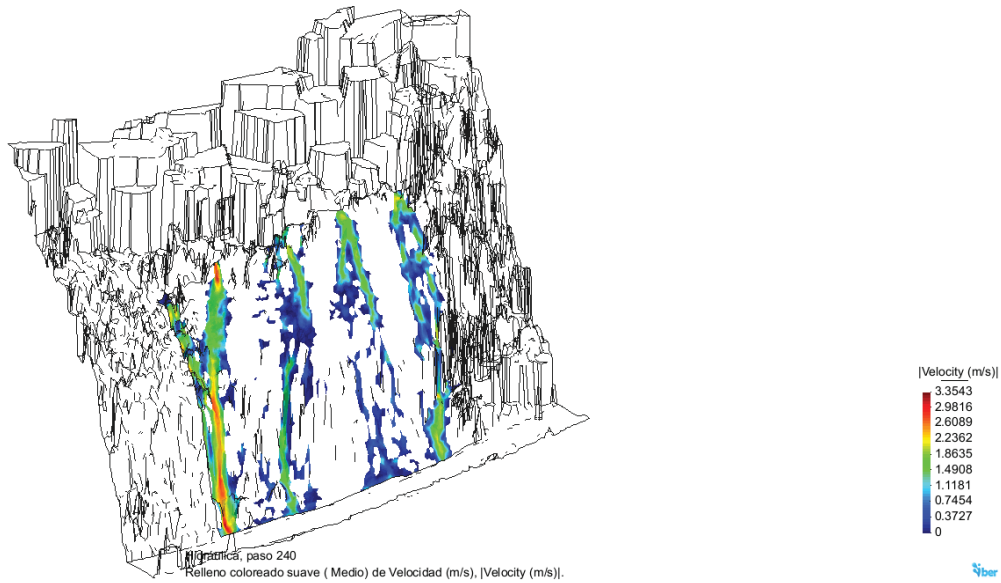
Periodos de Retorno	Velocidad de arrastre (m/s)	Velocidades máximas observadas (m/s)	
		General	Puntual
50	0,61	2,42	4,37
100	0,61	2,01	3,62



**Figura 6.** Punto crítico de escenario 1.

**Cuadro 10.** Velocidades críticas escenario 2.

Periodos de Retorno	Velocidad de arrastre (m/s)	Velocidades máximas observadas (m/s)	
		General	Puntual
50	1,52	2,23	3,35
100	1,52	1,85	3,32



**Figura 7.** Punto crítico de escenario 2.

**Cuadro 11.** Velocidades críticas escenario 3.

Periodos de Retorno	Velocidad de arrastre (m/s)	Velocidades máximas observadas (m/s)	
		General	Puntual
50	1,20-2,50	1,14	2,06
100	1,20-2,50	1,22	2,20

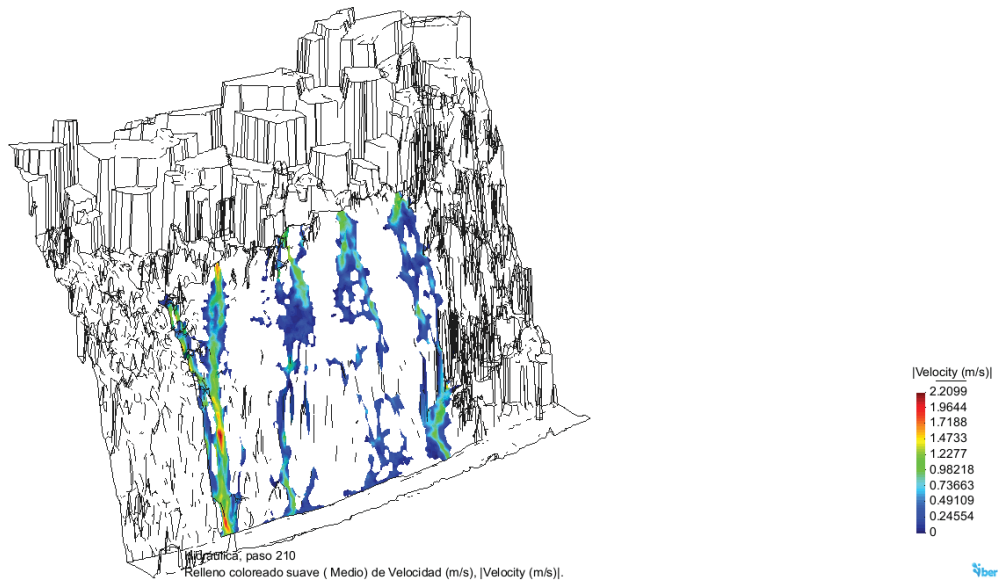


Figura 8. Punto crítico escenario 3.

Cuadro 12. Velocidades críticas escenario 4.

Periodos de Retorno	Velocidad de arrastre (m/s)	Velocidades máximas observadas (m/s)	
		General	Puntual
Cambio Climático	2,00-5,00	1,16	1,56

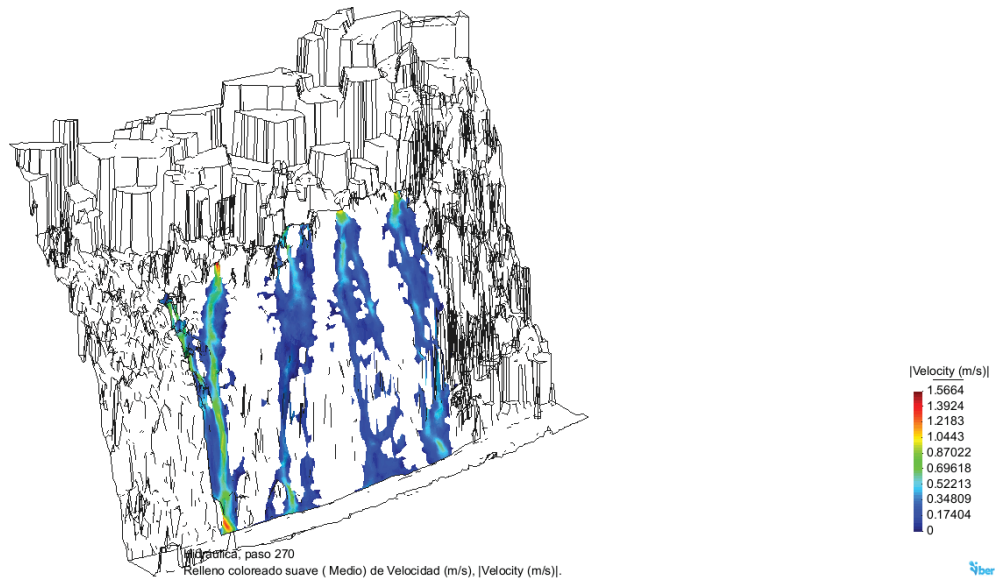


Figura 9. Punto crítico escenario 4.

De los cuadros presentados anteriormente se toma las velocidades de cada escenario para realizar una comparativa entre las etapas de cada uno y los periodos de retorno de las tormentas escogidas.

**Cuadro 13.** Comparativa escenarios 1 y 2 T50 años.

Escenario	Velocidades observadas (m/s)	
	General	Puntual
1	2,42	4,37
2	2,23	3,35

**Cuadro 14.** Comparativa escenarios 1 y 2 T100 años.

Escenario	Velocidades observadas (m/s)	
	General	Puntual
1	2,01	3,62
2	1,85	3,32

**Cuadro 15.** Comparativa escenarios 2 y 3 T50 años.

Escenario	Velocidades observadas (m/s)	
	General	Puntual
2	2,23	3,35
3	1,14	2,06

**Cuadro 16.** Comparativa escenarios 2 y 3 T100 años.

Escenario	Velocidades observadas (m/s)	
	General	Puntual
2	1,85	3,32
3	1,22	2,2

## Discusión

Tanto como para los periodos de retorno de 50 y 100 años se tienen velocidades de arrastre considerables debido al tipo de suelo del sitio. Para un mismo uso de suelo se observa una diferencia en el comportamiento de los flujos de un periodo de retorno a otro, sin embargo es un dato poco esperado.

Las velocidades en el periodo de retorno de 100 años tienden a disminuir, pero no así la distribución de las escorrentías que tiende al aumento por el talud, debido a que otros sectores toman el excedente del caudal. Debido a esto se encontraron velocidades de flujo mayores en periodos de retorno menores.

Las velocidades puntuales tienden a ser mayores que en el resto del talud, al comportarse de esta forma se analizó dos condiciones una puntual y otra general, para así tener más claro los resultados. Enfocarse en velocidades puntuales puede ser un error debido a que el resto de las áreas posee velocidades que pueden exceder las condiciones límites y pueden llegar tener una mayor importancia.

De los modelos de escorrentía superficial para suelo franco arcilloso arenoso, podemos afirmar que las velocidades de flujo exceden el límite permisible y se puede contemplar arrastre no solo de finos, si no además de bloques o gravas de mayor tamaño. Se aprecia una disminución de velocidades al aumentar el periodo de retorno se puede ligar este efecto a la rugosidad asignada y la topografía del modelo.

Para los suelos franco arcilloso arenoso desnudo se aprecia que de igual forma se sobrepasan los valores permisibles, sin embargo a diferencia del uso de suelo anterior la duración del evento donde se presentan los flujos más críticos es menor. Al igual que en el uso de suelo anterior las velocidades disminuyen al aumentar el periodo de retorno, por ello se asume también que las condiciones antes mencionadas influyen en este uso de suelo.

Los efectos de cobertura vegetal muestran una excedencia de los flujos sobre todo a nivel puntual, las velocidades a nivel general llegan al límite para pastos cercanos a los 50 centímetros, por otra parte las velocidades no superan el valor límite en pastos de un metro. Podríamos afirmar que al aumentar la altura de los pastos se disminuye la velocidad de escorrentía y así mismo la erosión, sin embargo no significa que se elimina del todo el arrastre de finos.

En este caso particular se observó que al aumentar el periodo de retorno aumenta la velocidad de escorrentía, se puede entender que, el aumento del flujo del agua en presencia de cobertura vegetal es directamente proporcional al aumento del periodo de retorno del evento, a diferencia de los dos casos anteriores.

El modelo de efecto por cambio climático cuenta con la mayor precipitación y la mayor cantidad de caudal, pese a esto se espera que la cobertura vegetal incremente para este efecto. Siendo así, las velocidades presentadas tanto generales como puntuales pueden superar las velocidades de arrastre en pastos con alturas de 50 centímetros, pero no así pastos de mayor altitud. Finalmente los flujos de escorrentía para efecto de cambio climático disminuyen con el aumento de la cobertura vegetal tanto en altura como en densidad.

Comparando los resultados de los escenarios podemos notar que el talud en su etapa inicial (escenario 1) contaba con altas velocidades de arrastre, esto explica la razón de aplicar una obra para atacar el problema de erosión. Al realizar la excavación para aplicar la malla de acero MINAX, modificó la rugosidad del talud y parte de la topografía a nivel superficial, por lo que el escenario se modifica (escenario 2).

Las velocidades en ambos periodos de retorno del primer escenario con respecto al segundo disminuyen, de igual forma que la duración del evento crítico donde los flujos sobrepasan el límite, por lo que las medidas aplicadas reducen en cierta medida los flujos de escorrentía. A pesar de aplicar el control de erosión las magnitudes siguen superando el límite, pero este sistema no solo busca controlar la erosión del talud, sino además contener los posibles bloques producto del desgaste de los suelos que los sujetan.

Contrastando los efectos del control de escorrentía aplicado en el talud (escenario 2) y un escenario donde se aplica un control de erosión por medio de vegetación nativa (escenario 3), se aprecia que para los dos periodos de retorno disminuyen los flujos de escorrentía superficial de manera significativa.

El cambio de rugosidad debido a la cobertura vegetal colabora en gran medida a la reducción de velocidades, pero no evita que aún aplicando una medida natural como control erosivo no exista la posibilidad de arrastre de finos en el sitio. Por otra parte dentro del modelo de cobertura vegetal, no se está contemplando el aumento de infiltración gracias a las raíces de las plantas y tampoco los efectos de evapotranspiración los cuales disminuyen el total de agua llovida que escurre por el sitio.



## Conclusiones

En la primera comparativa entre la condición inicial del talud y las obras aplicadas se observó una reducción de las velocidades, sin embargo no fue suficiente para evitar flujos erosivos. Se puede afirmar que la intervención del talud con la malla MINAX colabora en minimizar velocidades de arrastre, pero contribuye esencialmente en la retención de posible caída de bloques.

La comparativa entre la malla colocada y la cobertura vegetal propuesta, muestra la capacidad del control erosivo por medio de elementos naturales, ya que las escorrentías disminuyen significativamente entre el escenario de malla MINAX y el propuesto. Aunque el modelo de control erosivo siempre muestra picos de velocidad que pueden producir erosión, dicho modelo no contempla el aumento de infiltración y efectos de evapotranspiración que reducirían aún más las escorrentías.

El modelo propuesto debe llevar consigo al momento de sembrar la aplicación de geomallas o similares que podrían tomar parte de las velocidades y no afectar directamente el suelo, por lo que es posible que el modelo tenga un mejor desempeño. No obstante al ser el talud un conglomerado la malla MINAX juega un papel importante en retención y aun así permite revegetar el talud de manera natural aunque este signifique continuar erosionando durante el proceso.

El modelo propuesto termina ejerciendo una función de complemento para el caso estudiado, ya que al existir probabilidad de caída de bloques la malla MINAX adquiere relevancia.

Concluyendo el modelo de cambio climático para la propuesta de control, se visualiza la eficiencia del sistema de escorrentía inclusive para un evento de grandes proporciones, pues las velocidades observadas ni siquiera alcanzan las velocidades mínimas para arrastre de sedimentos.

## Recomendaciones

Es recomendable para este caso particular el empleo de vegetación nativa como un control de la erosión superficial, ya que un aumento de la cobertura vegetal y del tipo implementado contribuyen al aumento de rugosidad y este en la disminución de las velocidades de flujo. En tanto el riesgo de caída de bloques no sea parte de las condiciones del talud.

De no ser posible implementar por temas de costos, el empleo de vegetación nativa del sitio, es recomendable el uso de geomallas o geomembranas para disminuir los efectos de las velocidades directamente sobre el suelo, es necesario aclarar que esto no significa eliminar arrastre de finos, sino reducción de dichos efectos.

Para estudios geotécnicos en taludes es necesario la incorporación de modelos hidrodinámicos, para modelar el comportamiento de los flujos de agua sobre estos, ya que la mayoría de los problemas provienen del efecto de la escorrentía. Inclusive si los problemas que presentan los taludes son de inestabilidad, los modelos hidrodinámicos funcionan como un complemento de dichos estudios y así poder verificar la toma de decisiones para futuras obras de control.

Con el fin de ampliar el análisis y obtener una mayor exactitud en cuanto al porcentaje de infiltración se recomienda realizar un estudio de la capa inmediatamente inferior al punto analizado, ya que encontrar suelos con contenido orgánico a mayor profundidad puede aumentar las capacidades de porosidad de los suelos. Además puede dar a conocer otros aspectos de saturación y capacidad hidráulica intersticial, podrían reafirmar o aclarar la capacidad de infiltración del suelo.

La investigación queda abierta a un análisis de evapotranspiración y de infiltración de la cobertura vegetal investigada y a modificar el modelo de escorrentía para así obtener un modelo de control erosivo más exacto.

## Referencias

- [1] J.C. Lozano, “*Desarrollo de un modelo bidimensional hidrodinámico y de calidad en cuerpos de agua poco profundos*”, Tesis de Maestría, Universidad de los Andes Colombia, 2003. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/10014/u240078.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [2] I. Sánchez, “*Estrategias de manejo en el cultivo de avena (Avena Sativa) forrajera, como uso diferente del suelo en la zona norte de Cartago*”, Práctica Licenciatura, Universidad de Costa Rica, 2014. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/2511/1/36943.pdf>
- [3] J. Suárez, “*Deslizamientos Tomo II: Técnicas de Remediación. La Vegetación y los Deslizamientos*”, Tomo II, pp. 291-312, 2012. <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-ii-tecnicas-de-remediacion.html>
- [4] L.R. Holdridge, “*Life Zone Ecology. Tropical Science Center. (Jiménez, H. Trad: <<Ecología basada en zonas de vida>>*”, 1ª ed, San José, Costa Rica, 1982. <http://www.cct.or.cr/contenido/wp-content/uploads/2017/11/Ecologia-Basada-en-Zonas-de-Vida-Libro-IV.pdf>
- [5] A. Silva, “*Guía práctica para la estabilización de taludes en los suelos de Costa Rica utilizando vegetación nativa*”, Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica, 2013. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/xmlui/handle/123456789/4118>
- [6] E. Varela, “*Rediseño del sistema de evacuación de aguas y maximización de la cosecha de aguas, en la empresa Plantas y Flores Ornamentales C.A.B.H S.A, Llano Grande, Cartago*”, Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2013. [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5809/sistema\\_evacuacion\\_plantas\\_ornamentales.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5809/sistema_evacuacion_plantas_ornamentales.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [7] F. Torres, J. Padilla, C. Rodríguez, H. Ramírez, R. Cantero, “*La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia*”, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 32(3), pp. 163-172, 2016. Recuperado de: [https://www.scipedia.com/public/Torres-Bejarano\\_et\\_al.\\_2015a](https://www.scipedia.com/public/Torres-Bejarano_et_al._2015a)
- [8] Junta Administrativa de Servicios Eléctricos de Cartago (JASEC), “*Iluminando el Patrimonio. Manejo de Cuencas Hidrográficas*”, (2016, Sept 29). <https://consulta.jasec.go.cr/index.php/responsabilidad-social/iluminando-el-patrimonio/181-responsabilidad-social/jasec-y-el-ambiente/121-manejo-de-cuencas-hidrograficas>
- [9] K. Villagra, “*Informe de Resultados de Suelo*”, FUNDATEC, Instituto Tecnológico, Escuela de Ingeniería Agrícola de Costa Rica, 16 Agt, 2021, Sin publicar.
- [10] V. T. Chow, D. R. Maidment, L. W. Mays, “*Hidrología Aplicada (Saldarriaga, J. G. ed y trad)*”, McGraw-Hill, Colombia, 1994. Recuperado de : <https://baixardoc.com/documents/hidrologia-aplicada-ven-te-chow-5cae52662105a>
- [11] M. Villón, “*Hidrología*” (1.ª ed.) Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago, 2004.
- [12] J. Suárez, “*Control de Erosión en Zonas Tropicales*” Universidad Industrial de Santander, Colombia, 2001. Recuperado de: <https://www.erosion.com.co/control-de-erosion-en-zonas-tropicales.html>
- [13] V. T. Chow, “*Open-Channel Hydraulics.*” McGraw-Hill, New York, 1959. Recuperado de: <http://web.ipb.ac.id/~erizal/hidrolika/Chow%20-%20OPEN%20CHANNEL%20HYDRAULICS.pdf>