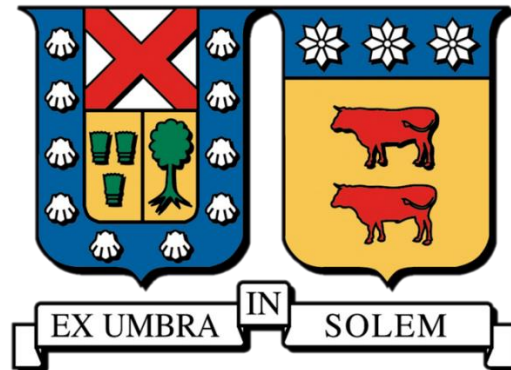


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE



**ESTUDIO DE LA DINÁMICA DE ALUVIONES A
TRAVÉS DE MÉTODOS NUMÉRICOS**

PABLO ALBERTO SÁNCHEZ AMPUERO

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA: Ph.D. CHRISTOPHER COOPER

PROFESOR CORREFERENTE: Ph.D. OLIVIER SKURTYS

NOVIEMBRE-2018

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a mis padres Conrado y Patricia por su infinito amor entregado a lo largo de mi vida, y también a su incalculable esfuerzo y trabajo que permitió la realización de mis estudios. Además deseo agradecer el apoyo de mis hermanos Felipe y Nicolás, como también el entregado por toda mi familia, la cual he decidido no mencionar para no dejar afuera a ninguno o ninguna, pero ellos saben lo importante que han sido, tanto en los buenos momentos como en los malos momentos vividos.

No puedo dejar de agradecer a mi profesor guía Christopher Cooper, el cual fue un pilar fundamental en el desarrollo de este trabajo, y entrego un importante apoyo académico. De igual manera agradecer al profesor correferente Olivier Skurtys, como también a todos los profesores tanto de mi etapa universitaria como escolar, los cuales ayudaron a mi formación, y parte de este éxito se los debo a ellos.

Por ultimo agradecer a mis amigos (ellos saben quienes son) que me acompañaron en este proceso, a mis compañeros de departamento durante mi etapa universitaria, Juan, Victor y Matias, a mis compañeros de fútbol de Richilagoza. y mis compañeros de basket de Gatitos Mecanicos.

Resumen

Las ecuaciones de shallow water (SWE) son un sistema de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas, las cuales resuelven una serie de problemas asociados a la dinámica de fluidos. Estas se derivan a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes y son utilizadas para modelar flujos de océanos, flujos atmosféricos e incluso se han aplicado para modelar avalanchas de nieve.

Para resolver numéricamente estas ecuaciones existen algunos software disponibles, uno de ellos es FullSWOF, el cual se basa en métodos de volúmenes finitos, y se encuentra en dos versiones gratuitas, en una dimensión y en dos dimensiones.

Uno de los fenómenos que ocurren con frecuencia en Chile son los aluviones, que han dejado una alta cifra de personas muertas y desaparecidas. Se busca modelar los aluviones a través de las SWE, específicamente el ocurrido en Villa Santa Lucía en Diciembre de 2017. Estas simulaciones tienen como objetivo encontrar los parámetros de mayor relevancia en la generación del escurrimiento, realizando simulaciones con diferentes mallas, diferentes condiciones de entrada, y diferentes condiciones del suelo.

Se logró mostrar que las SWE son una buena aproximación para los aluviones. Además se encontró un tamaño de malla ideal para la simulación, y al mismo tiempo la condición de contorno que se asemeja de mejor manera a la ocurrida, la cual corresponde a una velocidad de entrada de 20 [m/s]. De igual manera se demostró la importancia de la fricción en el desarrollo del escurrimiento, especialmente en el lecho del río.

Palabras Claves: Ecuaciones de shallow water, FullSWOF, Método de volúmenes finitos, Aluviones, Formula de Manning

Abstract

The shallow water equations (SWE) are a system of hyperbolic partial differential equations which solve a series of problems associated with fluid dynamics. These are derived from the Navier-Stokes equations and are used to model ocean flow, atmospheric flow and have even been applied to model snow avalanches.

There are a few available software programs to solve these equations numerically, one of them being FullSWOF, which is based in the finite volume method, and is accessible in two free versions, for one and two dimensions.

One of the phenomena that occurs frequently in Chile are mudflows, which have left a high number of persons dead and missing. We seek to model the mudflows through the SWE, specifically the occurrence in Villa Santa Lucia in December 2017. These simulations have the aim of finding the parameters of high relevancy in the generation of runoffs, performing simulations with different meshes, different entry conditions and different ground conditions.

The SWE were shown to be a good approximation for mudflows. In addition, an ideal mesh size was found for the simulation, and at the same time the boundary conditions that best resemble the occurrence, which corresponds to an entrance velocity of 20 [m/s]. The importance of friction in the development of runoff was also demonstrated, most importantly in the riverbed.

Keywords: Shallow water equations, FullSWOF, Finite volume method, Alluvium, Manning formula

Glosario

Aluvión	:	Flujo de barro que se desliza por gravedad por varios kilómetros.
FullSWOF	:	Software de carácter libre que resuelve las ecuaciones de shallow water
Python	:	Lenguaje de programación diseñado en los años 80.
C++	:	Lenguaje de programación diseñado en 1979
Análisis Numérico	:	Rama de la matemática basada en algoritmos para aproximar ecuaciones complejas.
Método de Volúmenes Finitos	:	Este método permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales.
h	:	Profundidad del agua.
u	:	Velocidad en el eje x
v	:	Velocidad en el eje y
nx	:	Número de nodos en el eje x
ny	:	Número de nodos en el eje y
dx	:	Tamaño espaciamiento de malla en la dirección x
dy	:	Tamaño espaciamiento de malla en la dirección y
dt	:	Tamaño espaciamiento temporal.
g	:	Aceleración de gravedad
n	:	Constante de fricción de Manning.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	II
Abstract	III
Glosario	IV
Índice de figuras	VII
Índice de cuadros	XI
1. Introducción y Objetivos	1
2. Marco Teórico	4
2.1. Ecuaciones de Shallow Water	4
2.1.1. Condiciones de borde	8
2.1.2. Coeficiente de fricción	9
2.2. Métodos Numericos	12
2.2.1. Método de Lax–Friedrichs	12
2.2.2. Método de Lax-Wendroff MacCormack	12
2.2.3. Método de Godunov	13
2.2.4. Método de MUSCL	13
2.2.4.1. Flux Limiter	14

2.2.5. Software Disponibles	16
2.3. Teoría de Aluviones	17
3. Metodología	19
3.1. Generación de Malla	19
3.2. FullSWOF	22
4. Caso de Estudio	25
5. Resultados y Análisis	28
5.1. Volumen Desplazado	28
5.2. Tamaño de Malla Ideal	30
5.3. Condiciones de Contorno	33
5.3.1. Calles Villa Santa Lucia	34
5.4. Fricción Variable	38
6. Conclusiones	59
Bibliografía	61
Anexos	64
Anexo A	64
Anexo B	70
Anexo C	72

Índice de figuras

3.1. Diferentes sub-mallas en Villa Santa Lucia. Recuperado de Google Earth	19
3.2. Polígonos en Autocad (La mitad inferior se encuentra con la malla creada.)	20
3.3. Numeración de sub.mallas creadas en Autocad	21
3.4. Malla de Villa Santa Lucia	21
3.5. Notación de las ecuaciones de shallow water.[1]	23
4.1. Villa Santa Lucia antes del aluvión. Recuperado de Google Earth	25
4.2. Punto de origen del aluvión de Villa Santa Lucia. Recuperado de Google Earth.	26
4.3. Imagen de Villa Santa Lucia después de ocurrido el aluvión. Recuperado de Sernageomin [2].	27
5.1. Imagen área del aluvión sobre Villa Santa Lucia. Recuperado de Diario La Tercera	28
5.2. Imagen en infrarrojo de Villa Santa Lucia. Recuperado de Sernageomin [2]	29
5.3. Área estimada de inundación. Recuperado de Google Earth	29
5.4. Ecurrimiento con malla de 151x226 nodos	30
5.5. Ecurrimiento con malla de 301x452 nodos	31
5.6. Ecurrimiento con malla de 226x339 nodos	31
5.7. Calles de Villa Santa Lucia. Recuperado de Google Earth.	34

5.8. Calles de Villa Santa Lucia visibles en la simulación	34
5.9. Ecurrimiento con malla de 151x226 nodos y un caudal de 1440 [m ³ /s] después de 700 [s]	35
5.10. Ecurrimiento con malla de 151x226 nodos y un caudal de 1440 [m ³ /s] después de 700 [s] (Vista Superior)	35
5.11. Ecurrimiento con malla de 151x226 nodos y un caudal de 2070 [m ³ /s] después de 500 [s]	36
5.12. Ecurrimiento con malla de 151x226 nodos y un caudal de 2070 [m ³ /s] después de 500 [s] (Vista Superior)	36
5.13. Ecurrimiento con malla de 151x226 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 300 [s]	37
5.14. Ecurrimiento con malla de 151x226 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 300 [s] (Vista Superior)	37
5.15. Fricción variable de 0.1 y 0.2. Recuperado de Google Earth	38
5.16. Ecurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 1440 [m ³ /s] después de 700 [s], con fricción de 0.1 y 0.2	39
5.17. Ecurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 1440 [m ³ /s] después de 700 [s], con fricción de 0.1 y 0.2 (Vista Superior)	39
5.18. Ecurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 1440 [m ³ /s] después de 800 [s] (700[s] con caudal), con fricción de 0.1 y 0.2	40
5.19. Ecurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 1440 [m ³ /s] después de 800 [s] (700[s] con caudal), con fricción de 0.1 y 0.2 (Vista Superior)	40
5.20. Ecurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 2070[m ³ /s] después de 500 [s], con fricción de 0.1 y 0.2	41
5.21. Ecurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 2070 [m ³ /s] después de 500 [s], con fricción de 0.1 y 0.2 (Vista Superior)	41
5.22. Ecurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 2070 [m ³ /s] después de 600 [s] (500[s] con caudal) con fricción de 0.1 y 0.2	42

5.23. Esguurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 2070 [m ³ /s] después de 600 [s] (500[s] con caudal), con fricción de 0.1 y 0.2 (Vista Superior)	42
5.24. Esguurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 300 [s], con fricción de 0.1 y 0.2	43
5.25. Esguurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 300 [s], con fricción de 0.1 y 0.2 (Vista Superior)	43
5.26. Esguurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 400 [s] (300 [s] con caudal), con fricción de 0.1 y 0.2	44
5.27. Esguurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 400 [s] (300[s] con caudal), con fricción de 0.1 y 0.2 (Vista Superior)	44
5.28. Esguurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 500 [s] (300 [s] con caudal), con fricción de 0.1 y 0.2	45
5.29. Esguurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 500 [s] (300[s] con caudal), con fricción de 0.1 y 0.2 (Vista Superior)	45
5.30. Área estimada de esguurrimiento en la malla. Recuperado de Google Earth.	47
5.31. Largos característicos del aluvión.	48
5.32. Fricción variable de 0.01 (0.025) 0.1 y 0.2	50
5.33. Esguurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 300 [s], con fricción de 0.025, 0.1 y 0.2	51
5.34. Esguurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 300 [s], con fricción de 0.025, 0.1 y 0.2 (Vista Superior) . . .	51
5.35. Esguurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 400 [s] (100[s] con caudal), con fricción de 0.025, 0.1 y 0.2 .	52
5.36. Esguurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 400 [s] (100[s] con caudal), con fricción de 0.025, 0.1 y 0.2 (Vista Superior)	52

5.37. Esgurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 500 [s] (200[s] con caudal), con fricción de 0.025, 0.1 y 0.2 .	53
5.38. Esgurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 500 [s] (200[s] con caudal), con fricción de 0.025, 0.1 y 0.2 (Vista Superior)	53
5.39. Esgurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 300 [s], con fricción de 0.01, 0.1 y 0.2	54
5.40. Esgurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 300 [s], con fricción de 0.01, 0.1 y 0.2 (Vista Superior) . . .	54
5.41. Esgurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 400 [s] (100[s] con caudal), con fricción de 0.01, 0.1 y 0.2 .	55
5.42. Esgurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 400 [s] (100[s] con caudal), con fricción de 0.01, 0.1 y 0.2 (Vista Superior)	55
5.43. Esgurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 500 [s] (200[s] con caudal), con fricción de 0.01, 0.1 y 0.2 .	56
5.44. Esgurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m ³ /s] después de 500 [s] (200[s] con caudal), con fricción de 0.01, 0.1 y 0.2 (Vista Superior)	56

Índice de cuadros

2.1. Valores del coeficiente de fricción de Manning [3].	11
5.1. Volumen depositado estimado.	30
5.2. Altura promedio y volumen para diferentes mallas.	32
5.3. Valores de Alturas, caudales y velocidades	33
5.4. Estimación de área que abarca el escurrimiento	47
5.5. Valores reales de largos característicos	49
5.6. Largos característicos del aluvión	49
5.7. Estimación de área que abarca el escurrimiento	57
5.8. Largos característicos del aluvión	58

Capítulo 1

Introducción y Objetivos

En la naturaleza ocurren diferentes fenómenos que en determinadas ocasiones se buscan modelar a través de sistemas de ecuaciones, con la finalidad de tener un mayor conocimiento de estos, o incluso llegar a predecir su ocurrencia. Muchas veces estas ecuaciones tienen formas complejas, las cuales no poseen una solución analítica, es por ello que se debe recurrir a métodos numéricos, para de esta manera obtener una solución aproximada.

Uno de los sistemas de ecuaciones que mayores aplicaciones posee son las ecuaciones de shallow water o ecuaciones de aguas someras, las cuales resuelven una serie de problemas presentes en la naturaleza, con diferentes tipos de fluidos. Éstas son un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas, las cuales son derivadas de las ecuaciones de Navier-Stokes. Para su derivación se deben hacer una serie de consideraciones tales como que la escala de longitud horizontal es mucho más grande que la profundidad del flujo, además se asume que la velocidad vertical es lo suficientemente pequeña para despreciarla, y que en la ecuación de conservación de momentum la distribución de presión vertical es prácticamente hidrostática.

Para la resolución numérica de estas ecuaciones, estas deben ser discretizadas utilizando algún método en particular, para luego resolverlas en algún lenguaje de progra-

mación. Para el caso de este trabajo se utilizará el software FullSWOF, el cual es código libre escrito en C++ y que entrega una serie de ventajas al momento de utilizarlo.

Alguna de las aplicaciones que posee estas ecuaciones, son la modelación del comportamiento de agua presente en la superficie del planeta, tomando en consideración las corrientes y olas que se generan a gran escala. La modelación de tsunamis es uno de los problemas que se resuelve en la actualidad a través de estas ecuaciones, las cuales entregan una primera aproximación, que puede ser muy útil para los diferentes centros de investigación.

Junto a lo descrito anteriormente, estas ecuaciones también sirven para representar el comportamiento del flujo en canales abiertos como los ríos e incluso dar el comportamiento de un fluido ante perturbaciones como puede ser la caída de un objeto sobre este, un caso práctico de hidrodinámica es el rompimiento de embalse el cual estas ecuaciones logran describir de gran manera.

Si bien muchas veces se asocian estas ecuaciones a el comportamiento de agua, estas también son utilizadas para otros fluidos, principalmente se utilizan en el comportamiento de la atmósfera terrestre y la propagación de ondas presentes en esta. Además se han aplicado en estudios sobre avalanchas de nieve, las cuales poseen un comportamiento similar al de un fluido [4].

Uno de los casos que se busca representar es el escurrimiento de un aluvión, el cual es un fenómeno que ocurre con frecuencia en Chile, debido principalmente a las intensas lluvias que caen en zonas con altas pendientes. Este tipo de desastres se han intensificado en los últimos años, dejando una cifra elevada de personas muertas y desaparecidas, además de los cuantiosos daños a viviendas, obras civiles y caminos.

El objetivo general de este trabajo es realizar un estudio de la dinámica de aluviones, con la finalidad de analizar los parámetros de mayor relevancia en el desarrollo de un escurrimiento. Para ello se realizará diversas simulaciones a través del software FullSWOF, comparando lo obtenido con lo ocurrido en la realidad. Los objetivos específicos son:

- Generar una herramienta computacional para mallar extensiones grandes de terreno.
- Encontrar las condiciones de contorno correctas para cada caso de estudio.
- Validar simulaciones con valores reales.
- Determinar los parámetros físicos relevantes que generan el escurrimiento.
- Extrapolar los resultados a otras localidades con riesgo potencial de aluviones.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Ecuaciones de Shallow Water

Las ecuaciones de Shallow Water, también llamadas ecuaciones de Saint-Venant en su forma unidimensional, se derivan a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, para lo cual se integran en profundidad y se asume que los gradientes de presión son hidrostáticos [5]. A continuación se muestran las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales describen el movimiento de sustancias fluidas viscosas y cuyo nombre se debe a los físicos Claude-Louis Navier and George Gabriel Stokes [6].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u u}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v}{\partial y} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.2)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v v}{\partial y} = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (2.3)$$

- En primer lugar se asumen que la viscosidad no es relevante en el desarrollo del problema, debido a que los términos convectivos son de mayor importancia que los difusivos, por lo cual los términos viscosos presentes en las ecuaciones se anulan.

$$\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$$

$$\mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0$$

- Se asume además que la gravedad no influye en el comportamiento del flujo.

$$\rho g_x = \rho g_y = 0$$

- La presión puede asumirse como hidrostática, por lo cual queda expresada de la siguiente manera:

$$P = \rho g h$$

$$\partial P = \rho g \partial h$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \rho g \frac{\partial h}{\partial x}$$

- De igual forma se asume una densidad constante lo que genera que esta se simplifique en todos los términos, quedando las ecuaciones de conservación de momentum de la siguiente forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = 0$$

- Integrando cada uno de los términos para las 3 ecuaciones en función de la altura h se obtiene.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{z_0}^{h+z_0} u dz = \frac{\partial(hu)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{z_0}^{h+z_0} u u dz = \frac{\partial(hu^2)}{\partial x}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \int_{z_0}^{h+z_0} u v dz = \frac{\partial(huv)}{\partial y}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{z_0}^{h+z_0} g h dz = \frac{1}{2} g \frac{\partial h^2}{\partial x}$$

En la ecuación de conservación de masa (ecuación 2.1), se realiza el mismo procedimiento descrito previamente, quedando de la siguiente manera.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{z_0}^{h+z_0} \rho dz = \frac{\partial \rho h}{\partial t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{z_0}^{h+z_0} \rho u dz = \frac{\partial \rho h u}{\partial x}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \int_{z_0}^{h+z_0} \rho v dz = \frac{\partial \rho h v}{\partial y}$$

De esta manera se obtienen las ecuaciones de Shallow Water en 2D.

$$\frac{\partial(h)}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) = 0 \quad (2.6)$$

Análogamente se puede realizar el mismo procedimiento para las ecuaciones escritas en 1D, lo cual entrega el siguiente resultado.

$$\frac{\partial(h)}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) = 0 \quad (2.8)$$

Para la resolución numérica las ecuaciones de shallow water pueden ser escritas de la siguiente manera.

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$F = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \\ huv \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_2 \\ \frac{q_2^2}{q_1} + \frac{1}{2}gq_1^2 \\ \frac{q_2q_3}{q_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$G = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_3 \\ \frac{q_2q_3}{q_1} \\ \frac{q_3^2}{q_1} + \frac{1}{2}gq_1^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

2.1.1. Condiciones de borde

Para la resolución de las ecuaciones de Shallow Water, existen dos condiciones de borde, las cuales son las más utilizadas [7]. La primera de ellas corresponde a una condición de borde de Dirichlet, en donde la onda rebota hacia el interior de la superficie de control, generando un efecto reflexivo. Este tipo de condición se utiliza en casos donde existen paredes y el dominio se encuentra restringido, para su implementación se debe imponer una velocidad cero en los bordes del dominio.

$$u = v = 0 \quad (2.12)$$

La segunda condición de borde corresponde a una condición de borde de Neumann, la cual establece un flujo libre, es decir el fluido sale del volumen de control. Adicionalmente para el desarrollo de problemas es posible aplicar condiciones de flujo de entrada en los bordes, estableciendo valores de altura y caudal. Para implementar esta condición se debe igualar a cero la derivada de la velocidad, como se muestra en la ecuación 2.13.

$$\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial h}{\partial n} = 0 \quad (2.14)$$

2.1.2. Coeficiente de fricción

El coeficiente de fricción representa la resistencia que opone una determinada superficie al paso libre de un flujo, para lo cual se deben hacer estimaciones que concuerden con lo propuesto en la literatura (ver Cuadro 2.1). El coeficiente se puede obtener a través de la fórmula de Manning, la cual es una evolución de la fórmula de Chézy para canales abiertos, la que es utilizada para el cálculo de la velocidad media en una sección del canal [3]. A continuación se presenta la fórmula de Chézy, en donde V representa la velocidad, R el radio hidráulico, S la pendiente del canal y C el coeficiente de Chézy.

$$V = C\sqrt{R \cdot S} \quad (2.15)$$

La fórmula de Manning queda establecida como:

$$V = \frac{1}{n} R_H^{2/3} S^{1/2} \quad (2.16)$$

Donde R_H representa el radio hidráulico del canal, S representa la pendiente del canal y n el coeficiente de fricción de Manning.

Existen una serie de factores que afectan al valor del coeficiente de fricción n, muchos de los cuales interactúan entre sí, algunos de los más importantes se detallan a continuación.

- **Rugosidad Superficial:** El primero de ellos es el de rugosidad superficial, el cual se representa por el tamaño y forma de grano de la superficie de un determinado canal. Entre mayor se este tamaño de grano mayor será el valor de n.
- **Vegetación:** El segundo parámetro importante es el de vegetación, la cual puede generar cambios importantes en el valor del coeficiente. En un canal con muy poca vegetación el coeficiente es del orden de 0.33, pero luego de un año este puede variar a valores cercanos a 0.55 e incluso luego de un largo periodo con vegetación espesa y arboles alcanzar valores de 0.1 e incluso superarlos. El valor mínimo que se debe utilizar para zonas con vegetación es de 0.5.

- **Irregularidades del canal y Alineamiento:** Es importante mencionar que las irregularidades que se encuentren en un canal, aumentaran el coeficiente de fricción, al mismo tiempo las curvas presentes en este también generaran un incremento del coeficiente de fricción.
- **Sedimentación y socavación:** Esto dependerá del material que se encuentre en el fondo del canal, lo cual puede ayudar a disminuir o aumentar el coeficiente de fricción.
- **Obstrucciones:** Una obstrucción del canal aumentara el coeficiente de fricción, dependiendo del tamaño y la forma de esta.
- **Nivel y Caudal:** Tanto el nivel del agua como el caudal influyen en el valor del coeficiente de fricción, ya que a mayores valores de estos, menos será la influencia de la superficie del terreno en el comportamiento del agua, es decir que a mayor nivel de agua, menor es el coeficiente de fricción.

En la siguiente tabla (Cuadro 2.1) se pueden visualizar valores para el coeficiente de Manning, los cuales presentan valores mínimos, normales y máximos para las diferentes condiciones del canal.

Cuadro 2.1: Valores del coeficiente de fricción de Manning [3].

Tipo de planicie de inundación en canales	Mínimo	Normal	Máximo
Pastizales sin matorrales			
Pasto Corto	0.025	0.030	0.035
Pasto Alto	0.030	0.035	0.050
Áreas Cultivadas			
Sin Cultivos	0.020	0.030	0.040
Campo de Cultivos	0.030	0.040	0.050
Matorrales			
Matorrales Dispersos	0.035	0.050	0.070
Pocos Matorrales	0.035	0.050	0.060
Matorrales Medios a Densos	0.070	0.100	0.160
Arboles			
Sauces Densos	0.110	0.150	0.200
Terreno Limpio con Troncos	0.050	0.060	0.060
Gran Cantidad de Arboles	0.100	0.120	0.160
Cauces Naturales			
Canales Naturales Limpios	0.010	0.020	0.030

2.2. Métodos Numericos

2.2.1. Método de Lax–Friedrichs

Es un método numérico para resolver ecuaciones diferenciales hiperbólicas, el cual se encuentra basado en diferencias finitas [8]. Es un método que se discretiza con diferencias centradas en el espacio y adelantadas en el tiempo. Al ser un método de primer orden es bastante disipativo, pero de igual forma se logran buenos resultados.

A continuación se muestra el esquema para uno de los flujos en 2D.

$$\begin{aligned} u_{i,j}^{n+1} &= \frac{1}{4}(u_{i+1,j}^n + u_{i-1,j}^n + u_{i,j+1}^n + u_{i,j-1}^n) \\ &\quad - \frac{\Delta t}{2\Delta x} [F_{i+1,j}^n - F_{i-1,j}^n] - \frac{\Delta t}{2\Delta y} [G_{i,j+1}^n - G_{i,j-1}^n] \end{aligned} \quad (2.17)$$

2.2.2. Método de Lax-Wendroff MacCormack

Este método al igual que el anterior se basa en diferencias finitas para resolver ecuaciones diferenciales hiperbólicas, el cual es un método explícito de segundo orden, tanto en el espacio como en el tiempo [9]. Para lograr esta discretización lo que se hace es usar un primer paso adelantado, mientras que el siguiente es una discretización atrasada.

A continuación se muestra el esquema a utilizar para la discretización de las ecuaciones de Shallow Water en 2D.

$$u1^* = u1^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F1(u1_{i,j}^n) - F1(u1_{i-1,j}^n)) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (G1(u1_{i,j}^n) - G1(u1_{i,j-1}^n)) \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} u1_{i,j}^{n+1} &= \frac{1}{2}(u1_{i,j}^n + u1_{i,j}^*) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} (F1(u1_{i+1,j}^*) - F1(u1_{i,j}^*)) \\ &\quad - \frac{\Delta t}{2\Delta y} (G1(u1_{i,j+1}^*) - G1(u1_{i,j}^*)) \end{aligned} \quad (2.19)$$

2.2.3. Método de Godunov

El esquema de Godunov es un método conservativo para la resolución de ecuaciones diferenciales parciales el cual fue desarrollado por S. K. Godunov en 1959, y consiste en un método de volúmenes finitos que posee como particularidad que el flujo $F_{i+1/2}$ entre dos celdas continuas se resuelve a través del problema de Riemann [10]. En las siguientes ecuaciones se muestra el esquema a utilizar para este método en 2D.

$$\frac{\partial}{\partial t} u_i + \frac{1}{\Delta x} [F_{i+1/2,j} - F_{i-1/2,j}] + \frac{1}{\Delta y} [G_{i,j+1/2} - G_{i,j-1/2}] = 0 \quad (2.20)$$

$$F_{i+1/2,j} = \frac{1}{2} \left(F(u_{i,j}) + F(u_{i+1,j}) - \frac{\Delta x}{\Delta t} (u_{i+1,j} - u_{i,j}) \right) \quad (2.21)$$

$$G_{i,j+1/2} = \frac{1}{2} \left(G(u_{i,j}) + G(u_{i,j+1}) - \frac{\Delta y}{\Delta t} (u_{i,j+1} - u_{i,j}) \right) \quad (2.22)$$

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2,j}^n - F_{i-1/2,j}^n) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (G_{i,j+1/2}^n - G_{i,j-1/2}^n) \quad (2.23)$$

2.2.4. Método de MUSCL

Monotonic Upwind Scheme for Conservation Laws (MUSCL) propuesto por Van Leer en 1979 es un esquema de resolución de ecuaciones diferenciales parciales a través de métodos de volúmenes finitos y que posee con principal característica proporcionar soluciones de alta orden y logrando resolver discontinuidades y grandes gradientes [11].

Este método toma como referencia el esquema de Godunov y se encarga de reemplazar las partes constantes por estados reconstruidos, por lo cual para cada celda se obtienen estados reconstruidos de izquierda y derecha y estos son utilizados para para

calcular los flujos en los bordes de la celda.

$$\frac{\partial}{\partial t} u_i + \frac{1}{\Delta x} [F_{i+1/2} - F_{i-1/2}] = 0 \quad (2.24)$$

$$u_{i-1/2}^R = u_i - \sigma_i \frac{\Delta x}{2} \quad u_{i+1/2}^L = u_i + \sigma_i \frac{\Delta x}{2} \quad (2.25)$$

$$F_{i+1/2}^n = \frac{1}{2} \left(F(u_{i+1/2}^L) + F(u_{i+1/2}^R) - \frac{\Delta x}{\Delta t} (u_{i+1/2}^R - u_{i+1/2}^L) \right) \quad (2.26)$$

$$u1^* = u1^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (F1_{i-1/2}^n - F1_{i+1/2}^n) \quad (2.27)$$

Con los valores de f^* se procede a realizar una reconstrucción de los valores a utilizar y posterior a ello se obtiene el valor de los flujos.

$$u_{i-1/2}^R = u_i^* - \sigma_i^* \frac{\Delta x}{2} \quad u_{i+1/2}^L = u_i^* + \sigma_i^* \frac{\Delta x}{2} \quad (2.28)$$

$$f1 = \frac{1}{2} f1^n + \frac{1}{2} f1^* + \frac{\Delta t}{2\Delta x} (F1_{i-1/2}^* - F1_{i+1/2}^*) \quad (2.29)$$

De los esquemas presentados anteriormente se debe considerar el significado de σ , el cual corresponde a un limitador de flujo (Flux Limiter), y es el encargado de evitar las oscilaciones en métodos de alta orden como MUSCL y de esta manera disminuir las soluciones de variación total. Para ello existe una cantidad importante de Flux Limiter, los cuales poseen características y utilidades diferentes [12]. Algunos de ellos serán descritos a continuación.

2.2.4.1. Flux Limiter

Minmod Uno de los más conocidos es Minmod, que contrario a Godunov que usa una pendiente constante este usa la pendiente más pequeña para poder calcular el valor

de las interfaces de las celdas, es decir en primer lugar se debe calcular las pendientes de cada lado de la celda Δf^- y Δf^+ :

$$\Delta u^- = \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} \quad \Delta u^+ = \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x} \quad (2.30)$$

Con estos valores calculados se procede a escoger el menor de ellos.

$$\sigma_i = \text{minmod}(\Delta u^-, \Delta u^+) \quad (2.31)$$

$$\sigma_i = \min(\Delta u^-, \Delta u^+) \quad \text{if } \Delta u^-, \Delta u^+ > 0 \quad (2.32)$$

$$\sigma_i = \max(\Delta u^-, \Delta u^+) \quad \text{if } \Delta u^-, \Delta u^+ < 0 \quad (2.33)$$

$$\sigma_i = 0 \quad \text{if } \Delta u^- * \Delta u^+ \leq 0 \quad (2.34)$$

Maxmod Es el caso contrario a minmod por lo cual se busca la pendiente mayor para poder representar el problema.

$$\Delta u^- = \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} \quad \Delta u^+ = \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x} \quad (2.35)$$

$$\sigma_i = \text{maxmod}(\Delta u^-, \Delta u^+) \quad (2.36)$$

Superbee Es una combinación de los métodos anteriores, minmod y maxmod

$$\sigma_i = \text{maxmod}(\Delta u^-, \Delta u^+) \quad (2.37)$$

$$\sigma_i^{(1)} = \text{minmod} \left(\frac{u_{i+1}^n - u_i^n}{\Delta x}, 2 \frac{u_i^n - u_{i-1}^n}{\Delta x} \right) \quad (2.38)$$

$$\sigma_i^{(2)} = \text{minmod} \left(2 \frac{u_{i+1}^n - u_i^n}{\Delta x}, \frac{u_i^n - u_{i-1}^n}{\Delta x} \right) \quad (2.39)$$

2.2.5. Software Disponibles

Existen una serie de software que resuelven estas ecuaciones, algunos de ellos es FullSWOF que será utilizado en el desarrollo de este trabajo [1]. Este utiliza el lenguaje de programación C++, el cual entrega una serie de métodos de resolución del sistema de ecuaciones y además agrega algunas condiciones adicionales asociadas a la superficie del terreno donde se resuelve el problema. FullSWOF se encuentra disponible en dos versiones, una en una dimensión y la otra en dos dimensiones.

Otro software disponible es Clawpack (Conservation-laws package) desarrollado por Randall LeVeque en 1994 [13]. Este utiliza el lenguaje de programación Fortran y resuelve una serie de problemas asociadas a ecuaciones conservativas a través de métodos de volúmenes finitos, específicamente a través del método de Godunov.

De igual manera existen algunos otros software que buscan resolver las ecuaciones de aguas someras los cuales son Gerris, el cual fue creado por Stéphane Popinet y cuenta con el apoyo del Instituto Jean le Rond d'Alembert, el cual es un Software de carácter libre y que actualmente cuenta con una nueva versión llamada Basilisk [14]. Otro Software disponible es Dass-Flow, el cual cuenta con una serie de versiones tanto en una dimensión como en dos dimensiones escritas en Fortran [15].

2.3. Teoría de Aluviones

Un aluvión es un flujo de barro, el cual arrastra materiales sueltos que se encuentran en su camino, este puede desplazarse por varios kilómetros desde su origen. A medida que avanza va aumentando su tamaño, lo cual provoca que sea capaz de mover grandes rocas, hojas, árboles y cualquier elemento que se encuentre en su trayectoria [16].

Este fenómeno ocurre con frecuencia en Chile, esto debido principalmente a la topografía y condiciones meteorológicas que se presentan en zonas cercanas a la cordillera de Los Andes. En los últimos 30 años ha ocurrido alrededor de 15 veces esta clase de fenómenos, dejando alrededor de 200 personas muertas, más de 50 desaparecidas, cerca de 150,000 damnificados y ocasionando costosos daños a casas, obras civiles y caminos.

El origen de los aluviones se debe a intensas precipitaciones en las altas cumbres cordilleranas, las cuales se combinan con el fenómeno de una isoterma cero sobre la altura promedio que esta tiene durante el año. La isoterma cero se entiende como una línea imaginaria que une los puntos en donde la temperatura es de cero grados, lo cual separa las precipitaciones en sólidas y líquidas, es decir por sobre esta línea cae nieve, mientras que bajo esta línea cae agua. Precisamente este último hecho genera que caiga agua en zonas en donde habitualmente cae nieve, provocando el deslizamiento de material por gravedad.

Este tipo de fenómenos son difíciles de predecir, principalmente debido a la serie de factores que lo generan, porque no siempre fuertes lluvias en cortos periodos de tiempo son sinónimo de aluviones, ya que además estas se deben combinar con altas temperaturas en el aire a determinadas alturas. Si bien estos son los dos factores más importantes existen algunos otros de interés, los cuales tienen que ver con la topografía del lugar y la forma del río, debido a que obstrucciones presentes en este último, o materiales sueltos en su origen pueden acrecentar este tipo de desastres naturales.

Además cabe mencionar que los aluviones ocurren en cortos periodos de tiempo, en pocos minutos recorren una gran cantidad de kilómetros, por lo cual no se pueden hacer evacuaciones preventivas ni tampoco evacuaciones en el momento de la llegada de este. Esto último precisamente ha generado la gran pérdida de vidas humanas durante el desarrollo del escurrimiento.

Otro hecho relevante es el cambio en las condiciones meteorológicas que se están viviendo en los últimos años, diversos estudios establecen cierta correlación entre el cambio climático y la frecuencia con que ocurren estos fenómenos [17]. Solo en Chile se ha observado un aumento sostenido en los últimos años, estudiando cierta conexión con el fenómeno de El Niño (El Niño-Southern Oscillation, ENSO), el cual genera cambios en la temperatura superficial de las aguas, afectando de cierta manera a las temperaturas de las corrientes de aire en las costas y a la caída de fuertes precipitaciones [18].

Entre los parámetros físicos más relevantes en el desarrollo de un aluvión se encuentran el caudal, la velocidad y la altura que este posee. Aunque es importante mencionar que este es un fenómeno acumulativo, en donde a medida que avanza, va arrastrando más material, lo cual aumenta su volumen y masa, haciéndolo aún más destructivo.

Si bien existe un amplio conocimiento sobre los aluviones, aún no se ha abarcado el campo de las simulaciones de manera detallada, y menos aun a través de las ecuaciones de Shallow Water, las cuales pueden entregar aproximaciones sumamente buenas del desarrollo del escurrimiento. Dentro de los trabajos que más se han acercado a este tipo de fenómenos, es el estudio de avalanchas de nieve en Suiza, a través de las mismas ecuaciones descritas con anterioridad [4].

Capítulo 3

Metodología

3.1. Generación de Malla

Para la creación de la malla se utilizaron los datos obtenidos de Google Earth, a través del software Cad Earth en su versión Demo, el cual importa valores topográficos a Autocad en su versión Student 2016, los cuales puede ser utilizados para realizar mallados y curvas de nivel de cualquier zona.

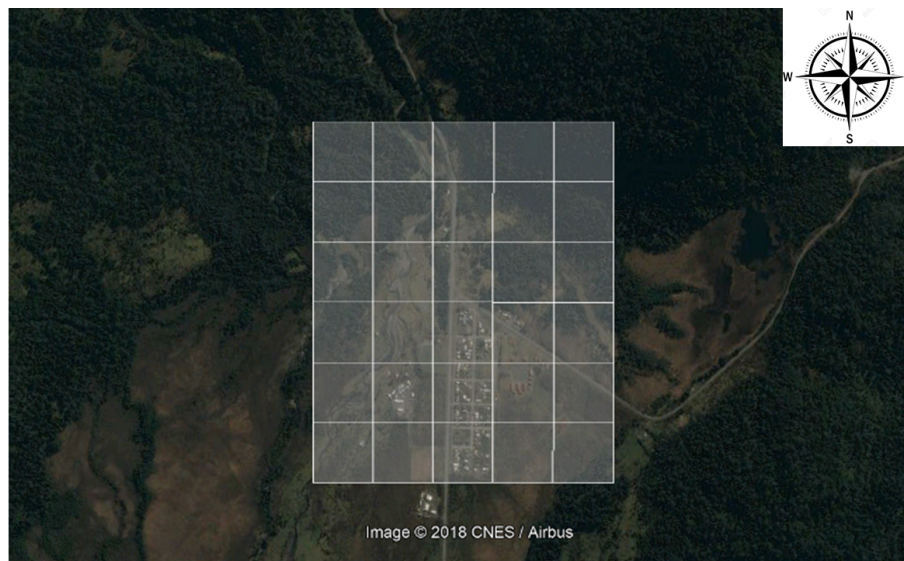


Figura 3.1: Diferentes sub-mallas en Villa Santa Lucia. Recuperado de Google Earth

Una de las complicaciones que se generan al crear la malla, es la limitación que existe de exportar solo sub-mallas de 50x50 nodos. Por lo cual si se requiere mallar una superficie extensa de terreno, se deben crear sub-mallas en base al ancho de los elementos deseados (ver Figura 3.1).

Para la creación de una sub-malla, se debe crear un polígono en Google Earth, para luego abrir Autocad, en donde primero se debe georreferenciar el dibujo. Posteriormente se debe utilizar la función 'Importar objeto de Google Earth', y así poder crear la malla con la función 'Importar malla de terreno de Google Earth' (ver Figura 3.2) .

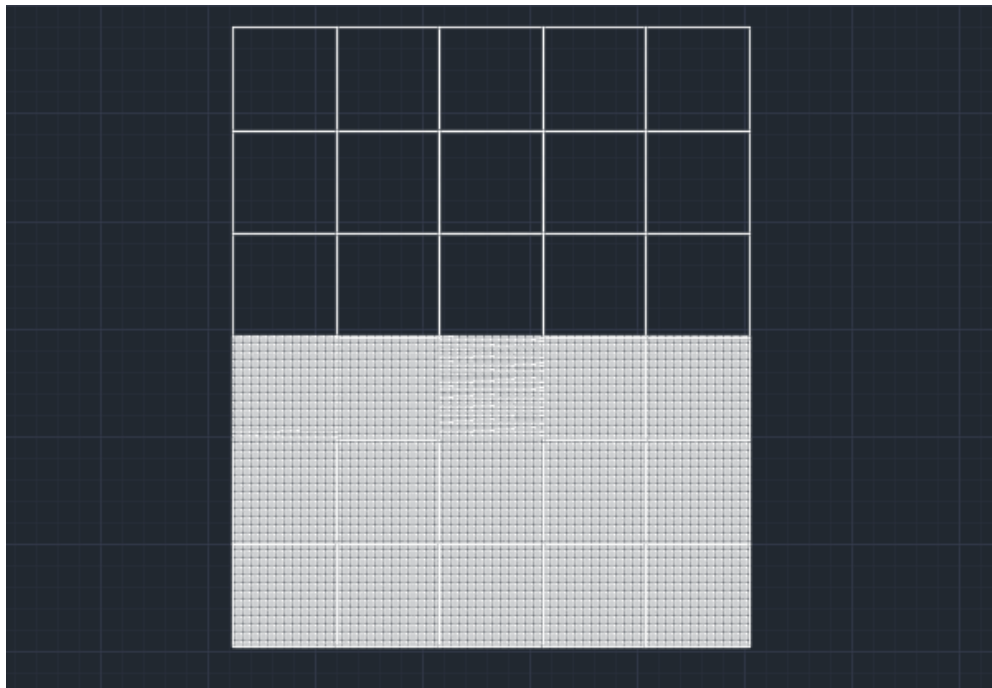


Figura 3.2: Polígonos en Autocad (La mitad inferior se encuentra con la malla creada.)

Finalmente para poder exportar la malla se debe utilizar la función 'Exportar malla a LandXML', la cual guardara el archivo. Esto último se debe repetir con todas las sub-mallas que se hayan generado, las cuales se enumeraran a partir de la esquina inferior izquierda, que será la malla1.XML, para luego ir subiendo en la numeración en el eje vertical, como se observa en la Figura 3.3.

3	6	9
2	5	8
1	4	7

Figura 3.3: Numeración de sub.mallas creadas en Autocad

Al guardar las mallas en este formato, es posible utilizar el código presentado en el Anexo A: Código para generación de malla, donde se deben imponer los parámetros, n_x el cual es el número de nodos de la sub-malla en el eje x, n_y el cual es el número de nodos de la sub-malla en el eje y, m_x el cual es el número de sub mallas en el eje x, m_y el cual es el número de sub-mallas en el eje y.

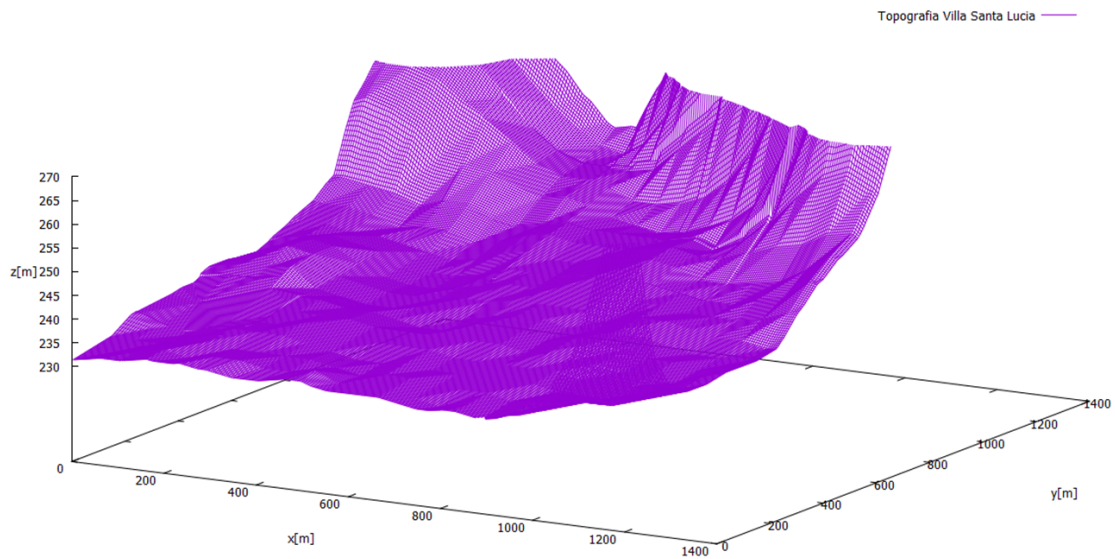


Figura 3.4: Malla de Villa Santa Lucia

3.2. FullSWOF

FullSWOF (Full Shallow Water equations for Overland Flow) es un software que se basa en métodos de volúmenes finitos, el cual es un código abierto escrito en el lenguaje de programación C++ y que se encuentra disponible de manera gratuita [1]. Este software se encuentra en dos versiones, en una dimensión y en dos dimensiones, siendo validado a través de diversos problemas que se han simulado.

Entre las principales ventajas que entrega FullSWOF, es la inclusión de la topografía a las condiciones iniciales del problema, además de la altura y velocidad del agua. Al suelo se le pueden agregar condiciones de infiltración de agua a través de la ecuación de Green-Ampt modificada y fricción al suelo través de la ecuación de Darcy-Weisbach y Manning [3]. Otra variable que se puede incluir en las simulaciones es la lluvia, la cual es constante en el espacio pero puede variar en el tiempo.

Este software fue validado utilizando soluciones analíticas de la biblioteca SWA-SHES (Soluciones analíticas de aguas poco profundas para estudios hidráulicos y ambientales), la cual reúne soluciones analíticas y semi-analíticas para las ecuaciones de aguas someras [19]. Esta entrega una gran variedad de soluciones, desde condiciones de flujo supercríticos y subcríticos, problemas con y sin lluvia, simulaciones con diferentes fricciones de suelo, entre muchos otros.

En FullSWOF se han desarrollado una serie de problemas asociados a flujos de agua, los cuales van desde problemas de rompimiento de embalse con valores reales, como también inundaciones de una determinada geografía incluyendo lluvia e infiltración del suelo [20]. Si bien el software en un inicio se desarrollo para problemas en el ámbito de la agricultura y las complicaciones que esta pueda generar, también se ha utilizado para resolver todo tipo de problemas de shallow water, los cuales van desde ondas atmosféricas, hasta inundaciones al interior de ciudades.

FullSWOF resuelve las ecuaciones de shallow water, adicionando un termino para la infiltración I , un termino para la lluvia R , un termino para la fricción S_f y por ultimo un termino S_0 para la topografía.

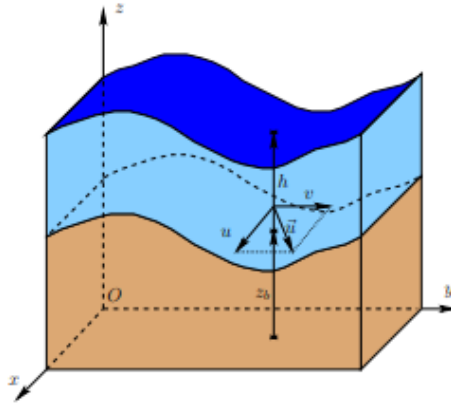


Figura 3.5: Notación de las ecuaciones de shallow water.[1]

$$\begin{aligned} \partial_t h + \partial_x(hu) + \partial_y(hv) &= R - I & (3.1) \\ \partial_t(hu) + \partial_x\left(hu^2 + \frac{gh^2}{2}\right) + \partial_y(huv) &= gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ \partial_t(hv) + \partial_x(huv) + \partial_y\left(hv^2 + \frac{gh^2}{2}\right) &= gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{aligned}$$

En donde el termino S_f queda expresado como:

$$S_f = n^2 \frac{|\vec{q}|}{h^3} \quad (3.2)$$

Las simulaciones que se realizaran en este trabajo no consideran la infiltración del suelo ni la presencia de lluvia, las cuales no son relevantes en el desarrollo del problema, además la primera de ellas presenta complicaciones en situaciones con lecho seco.

Para la resolución numérica de las ecuaciones se utilizara el esquema MUSCL con la reconstrucción minmond, la cual se utiliza para h, u y h+z, entregando un esquema de segundo orden en el espacio. Para los flujos de los esquemas numéricos se utiliza HLLC2 de Riemann solver el cual es una modificación del esquema The Harten-Lax-van Leer (HLL).

Para la resolución numérica de la fricción se utiliza un método semi-implícito[21], el cual es estable y reduce la complejidad computacional de otros métodos, conservando la estabilidad a través de la condición de CFL, posterior a ello se debe combinar con un método predictor-corrector de Runge Kutta.

$$U = \begin{pmatrix} h_i^{n+1} \\ q_i^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_i^* \\ q_i^* \left(1 + gn^2 \Delta t \frac{|q_i^n|}{h_i^n (h_i^{n+1})^{4/3}} \right)^{-1} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Capítulo 4

Caso de Estudio

El caso que se estudiara será el aluvión ocurrido en Villa Santa Lucia el 16 de diciembre de 2017, la cual es una localidad ubicada en la comuna de Chaitén, región de Los Lagos (Chile). La principal causa fue la lluvia caída durante los días 15 y 16, la cual provocó la ocurrencia del fenómeno que se desplazó a través del río Burritos depositándose finalmente en la villa, el cual dejó 21 personas muertas y 1 persona desaparecida.

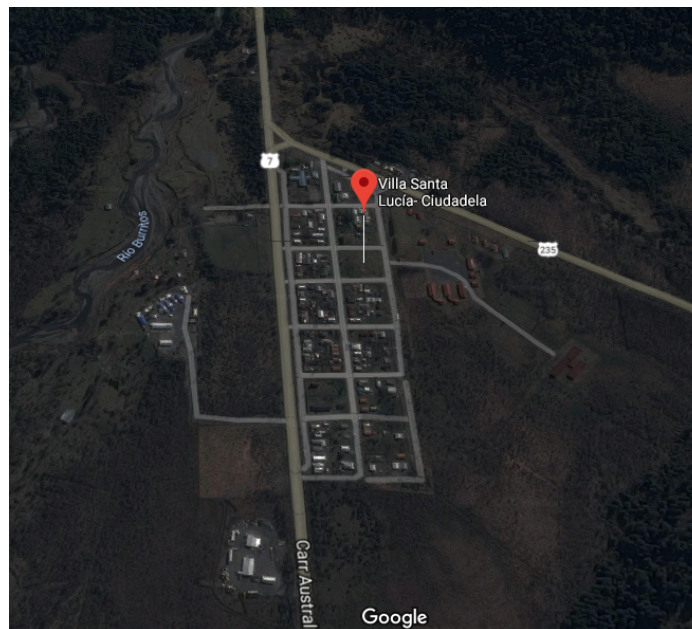


Figura 4.1: Villa Santa Lucia antes del aluvión. Recuperado de Google Earth

El origen de este aluvión se debió principalmente a las intensas precipitaciones ocurridas durante los días 15 y 16, las cuales llegaron a los 122 mm en tan solo 24 horas. Esto último sumado a las condiciones de temperatura del aire, que generó el movimiento ascendente de la isoterma cero, creó el ambiente propicio para el desarrollo de un aluvión.

Además en la zona en que se inició el aluvión, corresponde al origen del Río Burritos que se encuentra ubicado a 10 [km] de Villa Santa Lucía, a una altura aproximada de 1000 [m]. En este punto precisamente se cuenta con gran disponibilidad de sedimentos, tantos de orígenes glaciares como lo son la nieve no consolidada en el lugar, como los de orígenes volcánicos. Algunos de los sedimentos volcánicos provienen de la erupción del Volcán Chaitén en el año 2008, el cual dejó una gran cantidad de cenizas y árboles quemados, los cuales fueron un detonante más en la ocurrencia del aluvión [22].

Otro hecho importante que cabe mencionar es la topografía presente en el lugar, en donde la villa se encuentra rodeada de cordones montañosos con altas pendientes, lo cual provoca que la villa sea una zona propicia para la depositación de aluviones (ver Figura 4.2).



Figura 4.2: Punto de origen del aluvión de Villa Santa Lucía. Recuperado de Google Earth.

El aluvión dejó cuantiosos daños, tantos en vidas humanas como en obras materiales, dejando a 21 personas muertas y una persona desaparecida, de hecho la última persona encontrada fue 3 meses después de ocurrido el desastre [23]. Dentro de los daños materiales se encuentra la destrucción total de 28 casas y 5 infraestructuras públicas, las cuales no solo fueron por obra del aluvión, sino que también por los incendios que ocurrieron posterior a este.

Además cortó dos caminos, uno de ellos correspondiente a la carretera austral y se contabilizaron 112 damnificados y 213 desplazados, lo que provocó que se decretara zona de exclusión a la Villa Santa Lucia [24].



Figura 4.3: Imagen de Villa Santa Lucia después de ocurrido el aluvión. Recuperado de Sernageomin [2].

Capítulo 5

Resultados y Análisis

5.1. Volumen Desplazado

En base a imágenes tomadas horas después de ocurrido el aluvión, se logró apreciar y estimar una altura promedio, la cual no debe ser superior a 1.5 [m], esto debido a que el fluido no pasa por sobre las casas como se muestra en la Figura 5.1 y tampoco llega a cubrir la copa de los arboles como se aprecia en la misma figura.



Figura 5.1: Imagen área del aluvión sobre Villa Santa Lucia. Recuperado de Diario La Tercera

Al tener una altura promedio se hace necesario dimensionar la superficie que quedo cubierta con el barro, para de esta manera obtener un volumen aproximado de entrada.

En base a la siguiente imagen (Figura 5.2) en infrarrojo tomada el 19 de diciembre de 2017 por el Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea, se logra visualizar en tonos grises el área que abarco el aluvión [2].

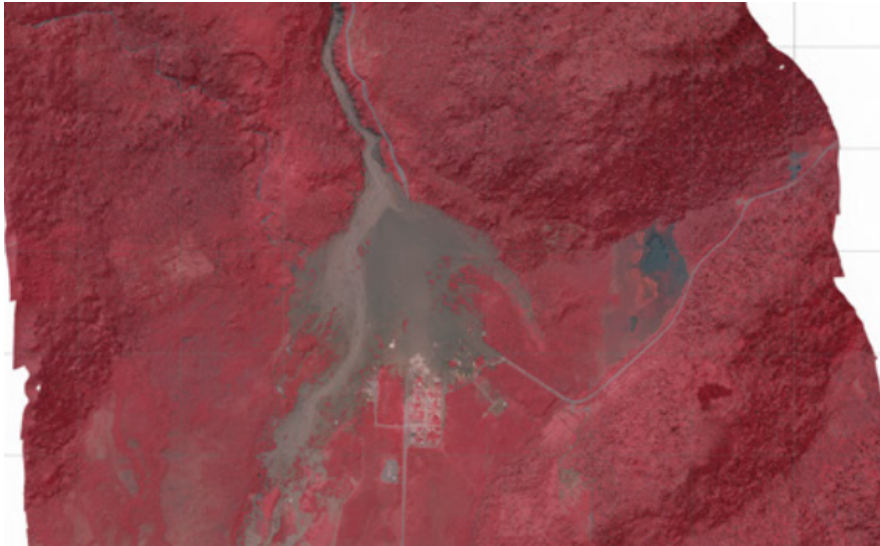


Figura 5.2: Imagen en infrarrojo de Villa Santa Lucia. Recuperado de Sernageomin [2]

Tomando esta última imagen como referencia, se dibujó un área aproximado sobre el mapa de la villa en Google Earth (ver Figura 5.3), para de esta manera obtener un valor del área que abarco el aluvión.

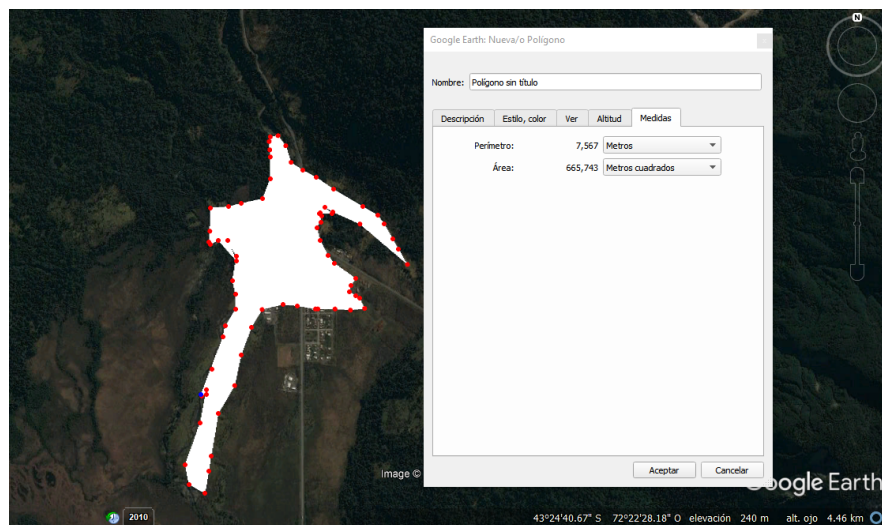


Figura 5.3: Área estimada de inundación. Recuperado de Google Earth

Considerando los valores mencionados se obtiene el siguiente volumen depositado.

Cuadro 5.1: Volumen depositado estimado.

Altura Promedio	1.5[m]
Área	665,000[m ²]
Volumen	1,000,000[m ³]

5.2. Tamaño de Malla Ideal

Para la resolución del problema se debe escoger un tamaño de malla ideal, el cual logre representar el escurrimiento de buena manera, pero al mismo tiempo facilite los tiempos de cálculos con la finalidad de realizar un mayor número de simulaciones en cierto periodo de tiempo. En primer lugar se probó un malla de 151x226 nodos, el cual posee elementos cuadrados de una tamaño de 4.8[m]. La Figura 5.4 corresponde a un flujo de 1530[m³/s] luego de 200[s] de simulación.

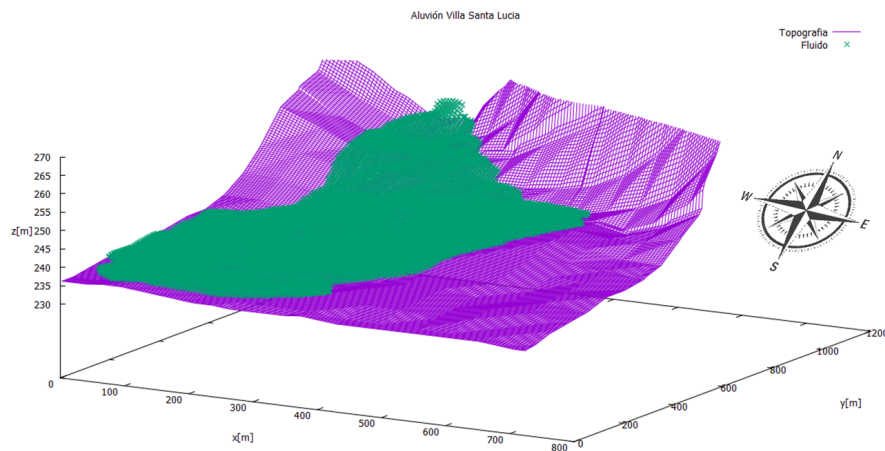


Figura 5.4: Esgurrimiento con malla de 151x226 nodos

Con la mismas condiciones de la Figura 5.4, se realizaron pruebas en dos mallas de mayor cantidad de nodos, una de ellas posee el doble de nodos en cada eje , quedando con 301x452 nodos, la cual entrega elementos cuadrados de 3.2[m] (ver Figura 5.5).

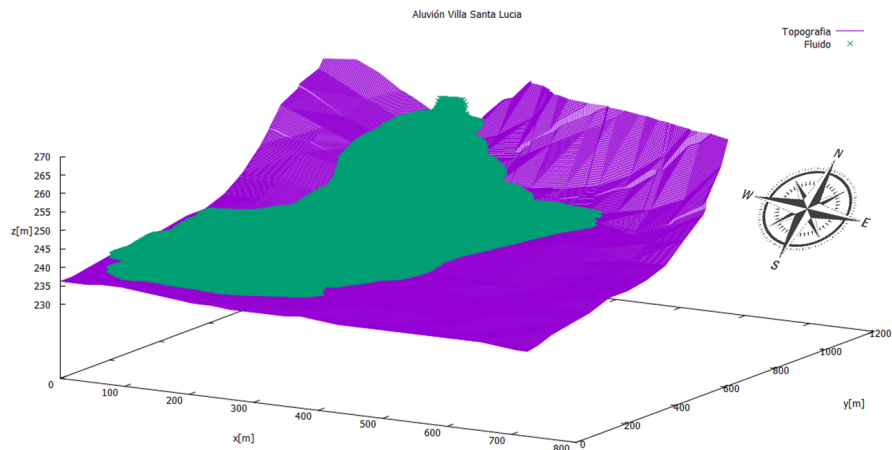


Figura 5.5: Esguerrimiento con malla de 301x452 nodos

La otra es una malla intermedia con 226x339 nodos y con elementos cuadrados de 2.4[m] (ver Figura 5.6). Además se comparó los valores promedios de altura y volumen entregados por las diferentes mallas considerando un tiempo de 200[s] (ver Cuadro5.2).

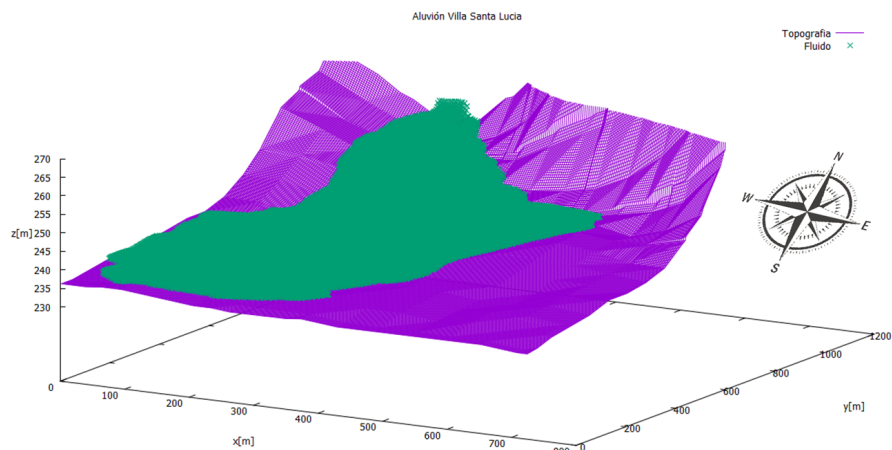


Figura 5.6: Esguerrimiento con malla de 226x339 nodos

Cuadro 5.2: Altura promedio y volumen para diferentes mallas.

Malla	Altura Promedio	0.4096[m]
150x226 nodos	Volumen	322,229[m ³]
Malla	Altura Promedio	0.4176[m]
226x339 nodos	Volumen	327609[m ³]
Malla	Altura Promedio	0.4023[m]
351x452 nodos	Volumen	316425[m ³]

Del Cuadro 5.2 se logra apreciar que los valores tanto para volumen como para altura promedio son similares entre si, lo cual concuerda con lo visualizado de manera cualitativa en las imágenes anteriores. Tomando en consideración esto último, se decide utilizar la malla mas gruesa para las simulaciones, la cual corresponde a la malla de 150x226 nodos, que nos permitirá realizar una mayor cantidad de simulaciones en un determinado tiempo.

5.3. Condiciones de Contorno

Las condiciones de contorno impuestas para el desarrollo del problema corresponden a la condición de Neumann, es decir el flujo sale del volumen de control. Adicionalmente se impone una condición de borde de entrada, en donde se varía el caudal y la altura del fluido, manteniendo constante el ancho de entrada de este, el cual equivale a 43[m]. En el Cuadro 5.3 se resume los 3 casos que se analizarán.

Cuadro 5.3: Valores de Alturas, caudales y velocidades

	Altura [m]	Caudal [m^3/s]	Velocidad [m/s]
Caso 1	4	1440	8.33
Caso 2	4	2070	12
Caso 3	4	3456	20

Tomando en consideración que el volumen depositado estimado en Villa Santa Lucía es de 1 millón de metros cúbicos, se probaron los 3 caudales a distintos tiempos, de manera que al volumen de control entre dicha cantidad de fluido, lo cual permita comparar las 3 simulaciones hechas.

5.3.1. Calles Villa Santa Lucia

Para la resolución de las simulaciones se visualizaran las calles de Villa Santa Lucia, específicamente la ruta principal y algunas calles transversales de interés. En la Figura 5.7 se muestran las calles, donde se destaca la ultima, la cual marca el limite de llegada del escurrimiento (ver Figura 4.3).

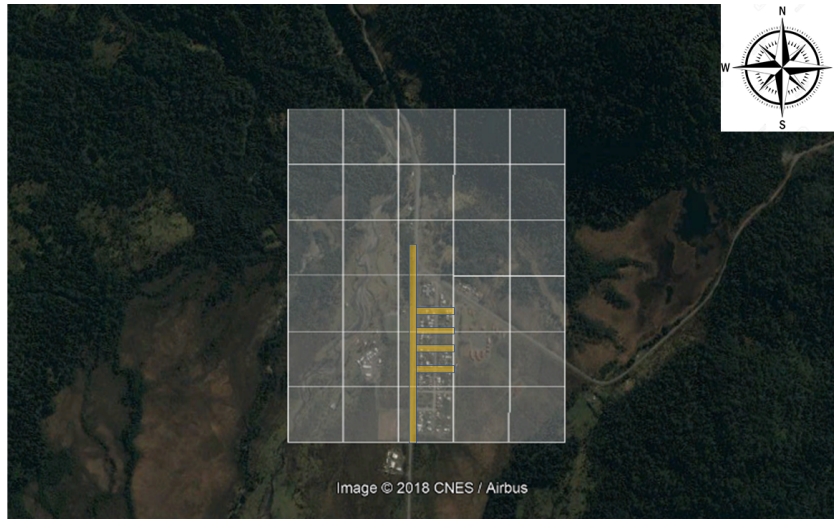


Figura 5.7: Calles de Villa Santa Lucia. Recuperado de Google Earth.

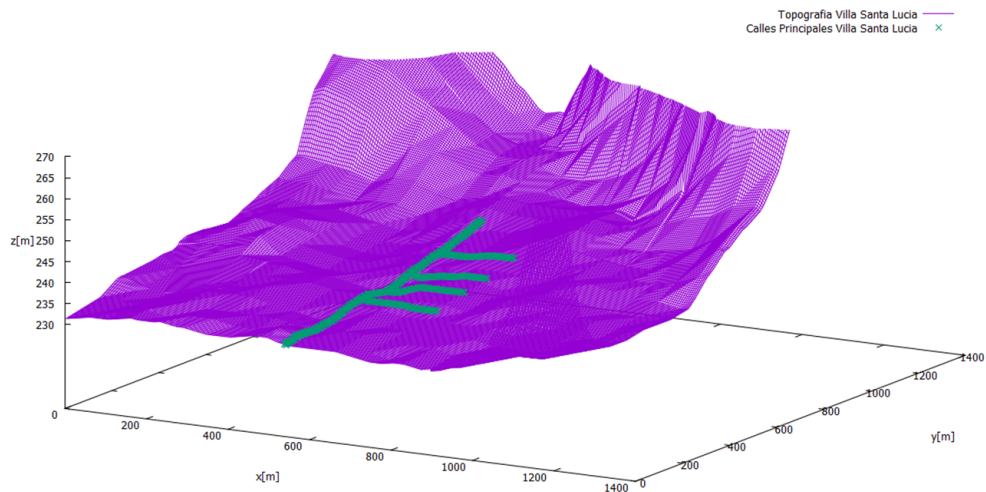


Figura 5.8: Calles de Villa Santa Lucia visibles en la simulación

Las siguientes imágenes corresponden a una simulación de 700[s] con la malla de 151x226 nodos, en la cual el caudal de entrada es de 1440 [m³/s], lo cual entrega un volumen depositado de 1 millón de metros cúbicos.

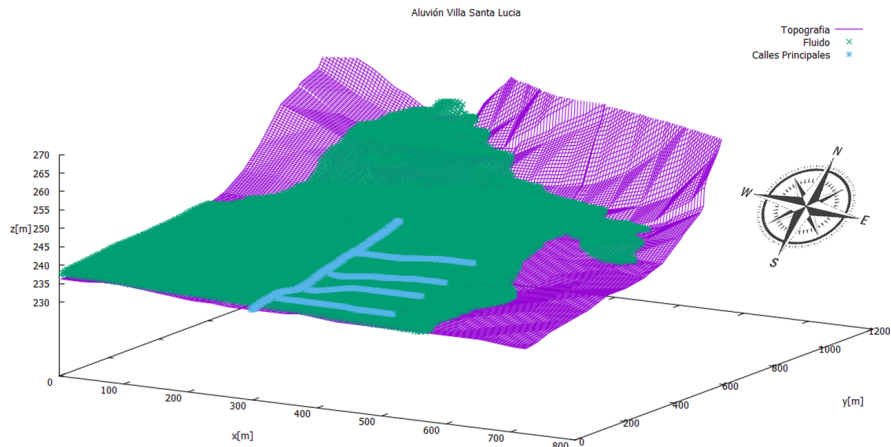


Figura 5.9: Esguerrimieuto con malla de 151x226 nodos y un caudal de 1440 [m³/s] después de 700 [s]

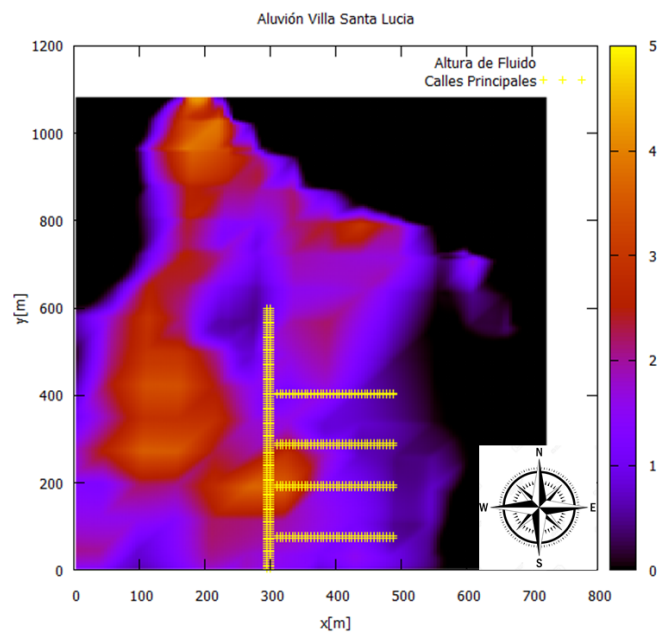


Figura 5.10: Esguerrimieuto con malla de 151x226 nodos y un caudal de 1440 [m³/s] después de 700 [s] (Vista Superior)

Luego se realizó una simulación de 500[s] con la malla de 226x339 nodos, en la cual el caudal de entrada es de 2070 $[m^3/s]$, lo cual entrega un volumen depositado de 1 millón de metros cúbicos.

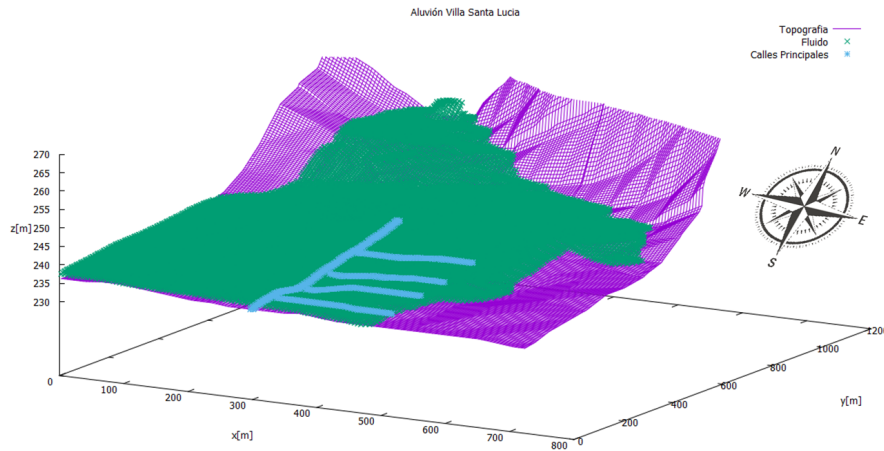


Figura 5.11: Esguerriminto con malla de 151x226 nodos y un caudal de 2070 $[m^3/s]$ después de 500 [s]

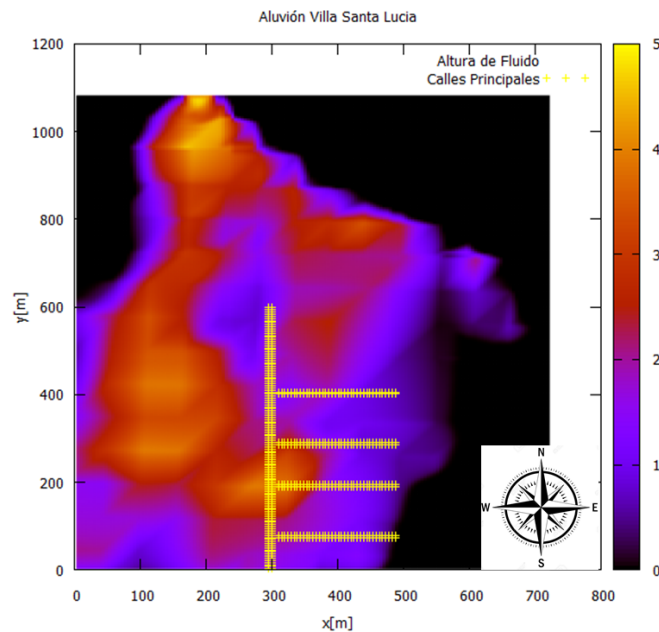


Figura 5.12: Esguerriminto con malla de 151x226 nodos y un caudal de 2070 $[m^3/s]$ después de 500 [s] (Vista Superior)

Finalmente se realizó una simulación de 300[s] con la malla de 351x452 nodos, en la cual el caudal de entrada es de 3456 [m³/s], lo cual entrega un volumen depositado de 1 millón de metros cúbicos.

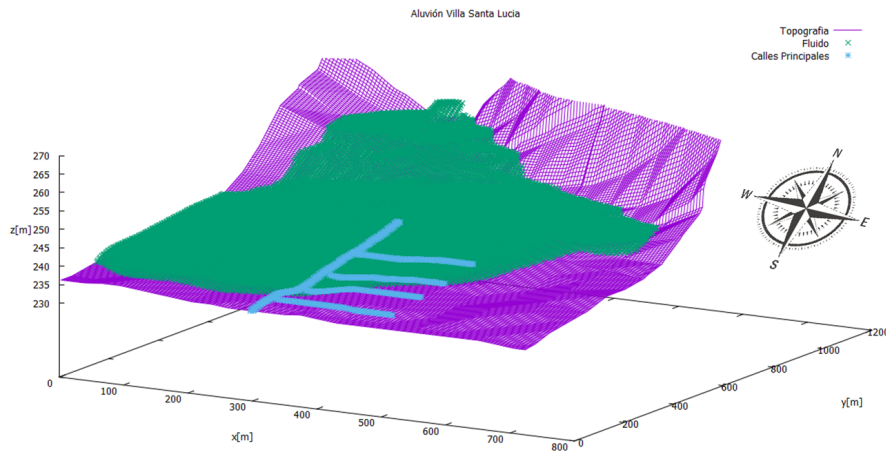


Figura 5.13: Esguerrimieuto con malla de 151x226 nodos y un caudal de 3456 [m³/s] después de 300 [s]

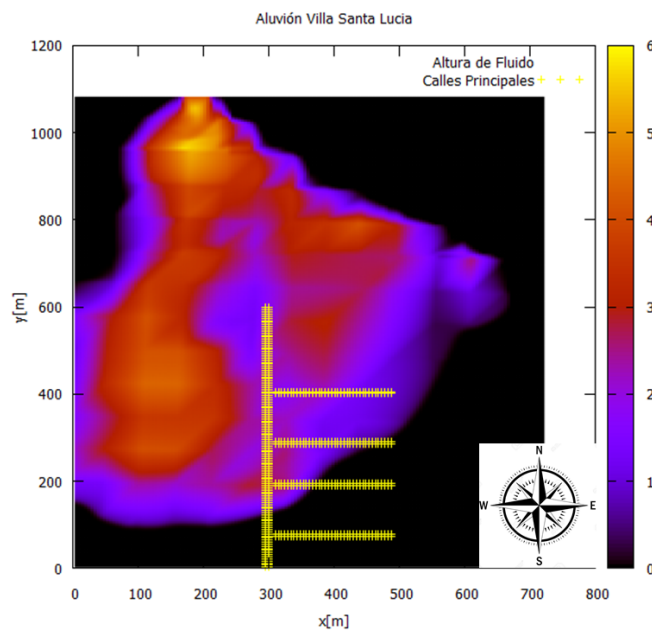


Figura 5.14: Esguerrimieuto con malla de 151x226 nodos y un caudal de 3456 [m³/s] después de 300 [s] (Vista Superior)

Tomando en consideración los resultados obtenidos, se puede apreciar que en las simulaciones con menor caudal el aluvi3n sobrepasa la villa, lo cual no sucedi3 en la realidad ya que este se fren3 precisamente en la 3ltima calle que se aprecia en el mapa.

Para lograr este frenado del aluvi3n, y al mismo tiempo tomar una decisi3n respecto a cu3l condici3n de entrada es la m3s adecuada se propone cambiar las condiciones del suelo, agreg3ndole una fricci3n variable.

5.4. Fricci3n Variable

En base a las 3ltimas simulaciones se decidi3 utilizar una fricci3n variable de 0.1 y 0.2, esto debido a que el valor de 0.2 se utiliza en zonas con alta vegetaci3n como se aprecia en el Cuadro 2.1. La fricci3n mayor se colocar3 en las zonas de mayor vegetaci3n y en las casas que componen la villa. Esto 3ltimo se puede apreciar en la Figura 5.15, en donde las zonas de color blanco poseen una fricci3n de 0.2, mientras que el resto de la malla tendr3 una fricci3n de 0.1.



Figura 5.15: Fricci3n variable de 0.1 y 0.2. Recuperado de Google Earth

Las simulaciones que se mostraran con fricción variable fueron realizadas en una nueva malla que posee elementos de 4.8[m], pero la cual posee más nodos tanto en el eje vertical como horizontal, lo cual nos entrega una malla de 251x276 nodos. Las primeras imágenes corresponde a los resultados luego de 700[s] con un caudal de 1440[m³/s]

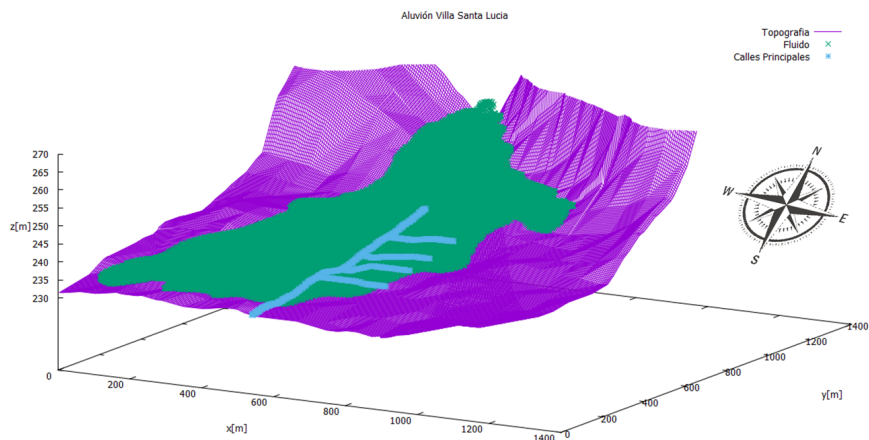


Figura 5.16: Esguerriminto con malla de 251x276 nodos y un caudal de 1440 [m³/s] después de 700 [s], con fricción de 0.1 y 0.2

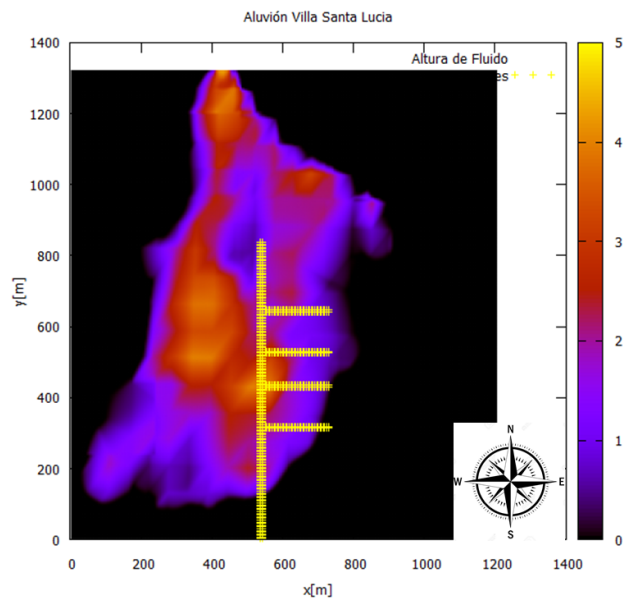


Figura 5.17: Esguerriminto con malla de 251x276 nodos y un caudal de 1440 [m³/s] después de 700 [s], con fricción de 0.1 y 0.2 (Vista Superior)

Posterior a ello se continuo con la misma simulación, pero adicionando 100 [s] sin la entrada de caudal con la finalidad de observar el desarrollo de este.

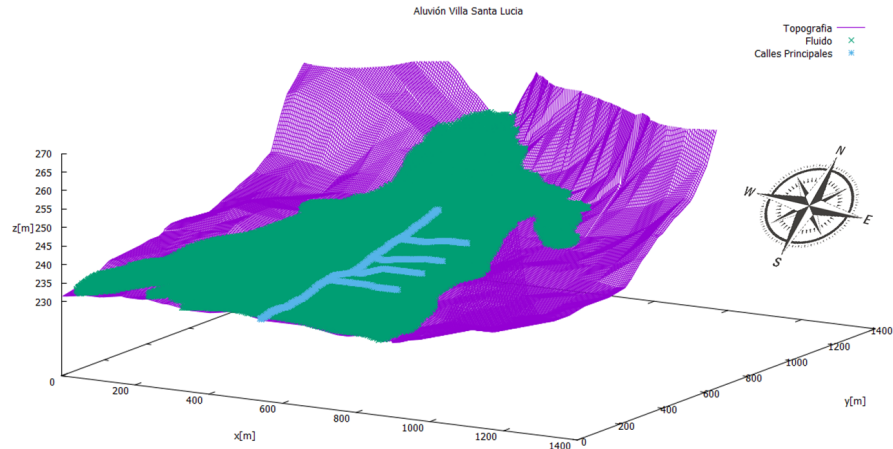


Figura 5.18: Esgurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 1440 [m^3/s] después de 800 [s] (700[s] con caudal), con fricción de 0.1 y 0.2

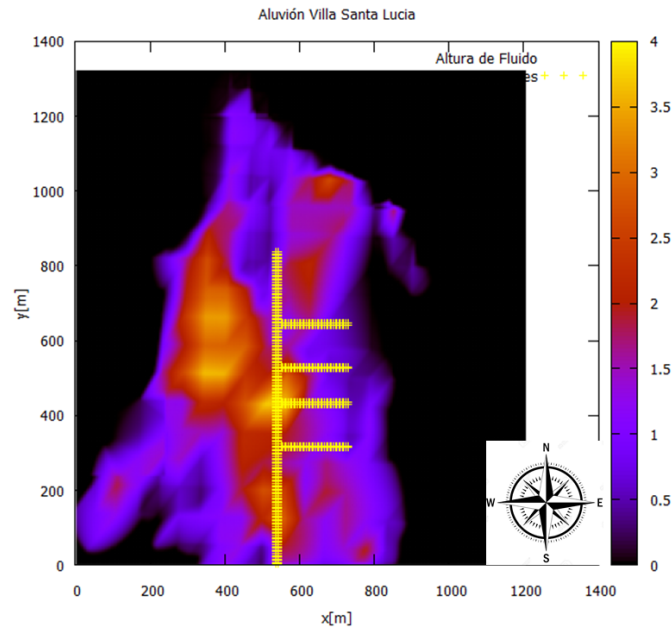


Figura 5.19: Esgurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 1440 [m^3/s] después de 800 [s] (700[s] con caudal), con fricción de 0.1 y 0.2 (Vista Superior)

De manera análoga se realizó la simulación con fricción variable para un caudal de 2070 $[m^3/s]$, en donde se presentan los resultados a los 500[s], los cuales equivalen a la entrada de 1 millón de metros cúbicos.

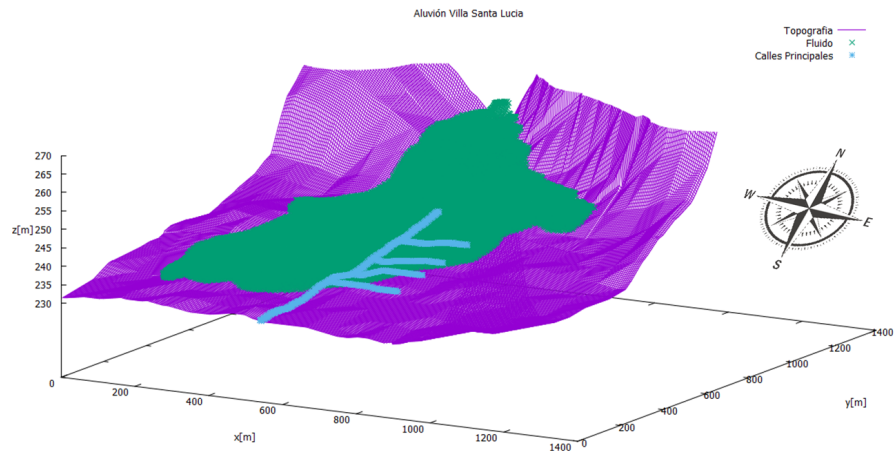


Figura 5.20: E scorrimento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 2070 $[m^3/s]$ después de 500 [s], con fricción de 0.1 y 0.2

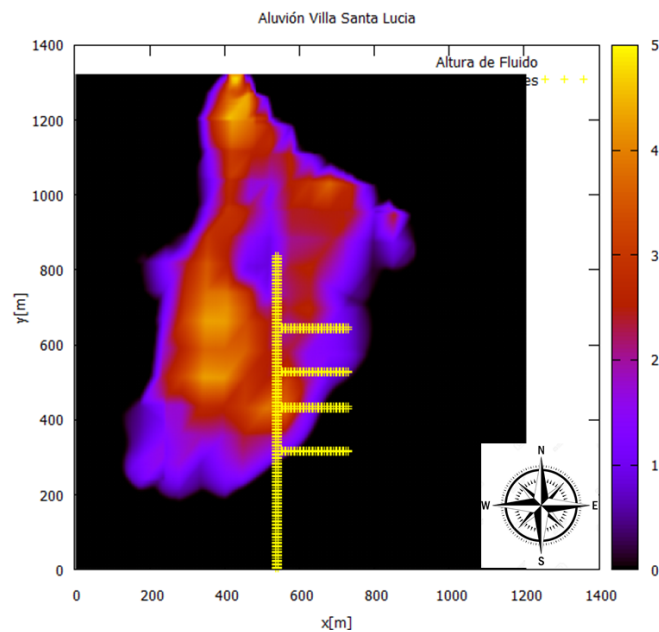


Figura 5.21: E scorrimento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 2070 $[m^3/s]$ después de 500 [s], con fricción de 0.1 y 0.2 (Vista Superior)

Al igual que para el caudal anterior se siguió con la simulación otros 100 [s] sin caudal de entrada, cuyos resultados se presentan a continuación.

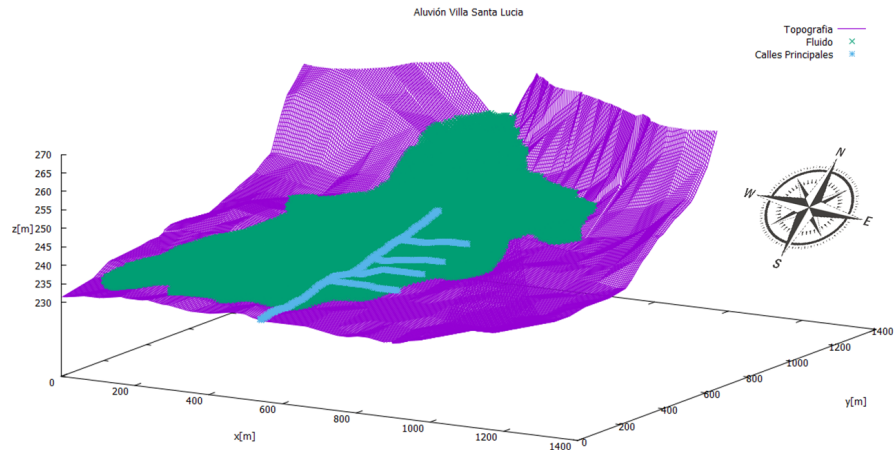


Figura 5.22: Esguerrimieuto con malla de 251x276 nodos y un caudal de 2070 [m³/s] después de 600 [s] (500[s] con caudal) con fricción de 0.1 y 0.2

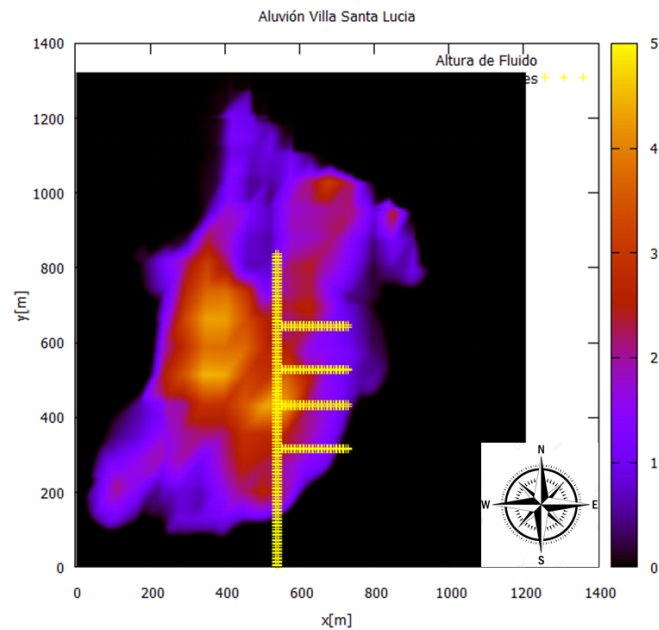


Figura 5.23: Esguerrimieuto con malla de 251x276 nodos y un caudal de 2070 [m³/s] después de 600 [s] (500[s] con caudal), con fricción de 0.1 y 0.2 (Vista Superior)

Finalmente se realizó la simulación con el caudal de $3456 [m^3/s]$, cuyos resultados que se muestran a continuación corresponde a los $300[s]$, los cuales equivalen a la entrada de 1 millón de metros cúbicos.

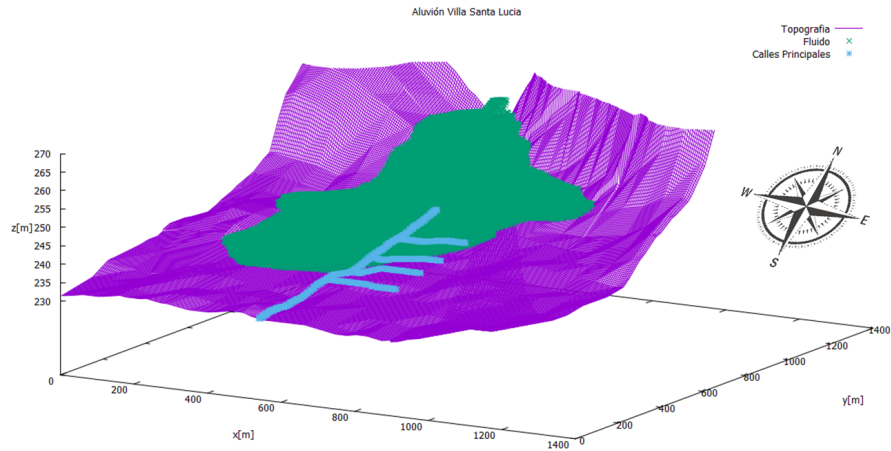


Figura 5.24: Esguerriminto con malla de 251×276 nodos y un caudal de $3456 [m^3/s]$ después de $300 [s]$, con fricción de 0.1 y 0.2

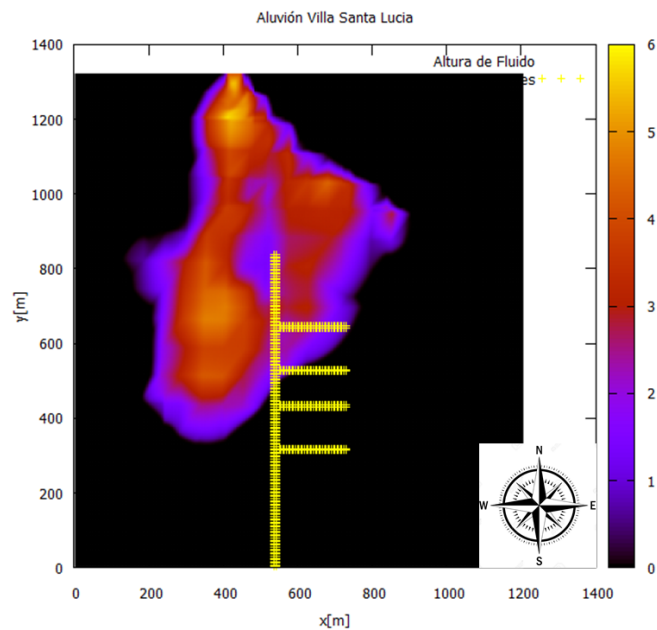


Figura 5.25: Esguerriminto con malla de 251×276 nodos y un caudal de $3456 [m^3/s]$ después de $300 [s]$, con fricción de 0.1 y 0.2 (Vista Superior)

De igual manera que las simulaciones anteriores se continuaron los cálculos otros 100[s] sin caudal de entrada, resultados que se muestran en las siguientes imágenes.

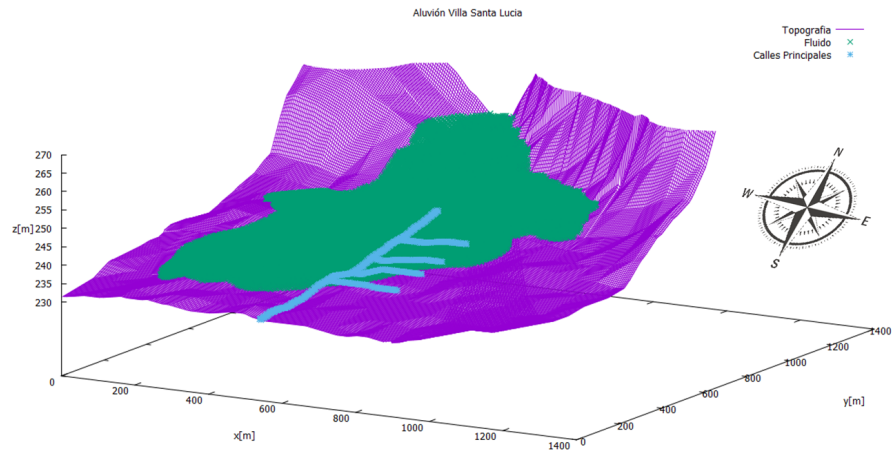


Figura 5.26: Esguerrimamiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m^3/s] después de 400 [s] (300 [s] con caudal), con fricción de 0.1 y 0.2

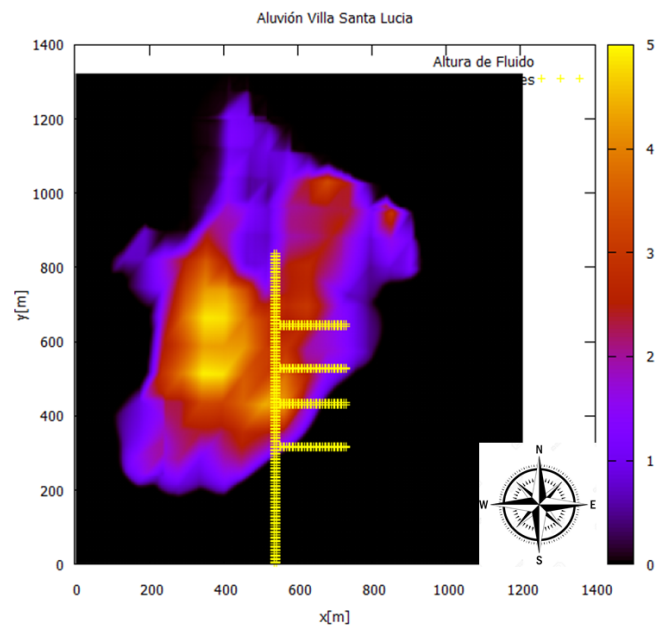


Figura 5.27: Esguerrimamiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m^3/s] después de 400 [s] (300[s] con caudal), con fricción de 0.1 y 0.2 (Vista Superior)

Adicionalmente para el caudal de $3456 \text{ [m}^3/\text{s]}$ se muestran los resultados para el escurrimiento luego de 500 [s] , en los cuales los primeros 300 [s] corresponden a la entrada de caudal, mientras que los siguientes 200 [s] son sin caudal.

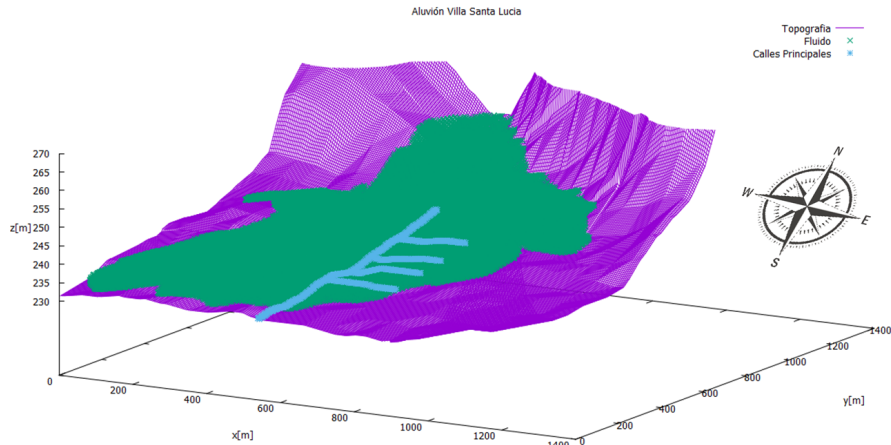


Figura 5.28: Escurrimiento con malla de 251×276 nodos y un caudal de $3456 \text{ [m}^3/\text{s]}$ después de 500 [s] (300 [s] con caudal), con fricción de 0.1 y 0.2

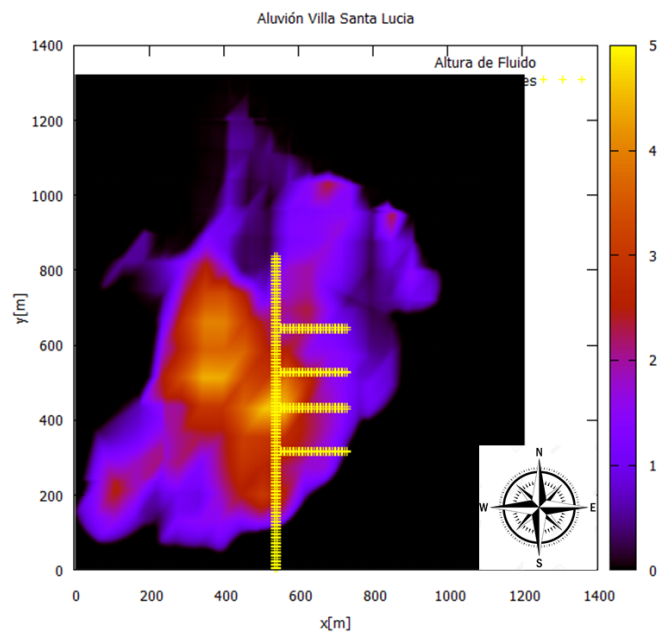


Figura 5.29: Escurrimiento con malla de 251×276 nodos y un caudal de $3456 \text{ [m}^3/\text{s]}$ después de 500 [s] (300 [s] con caudal), con fricción de 0.1 y 0.2 (Vista Superior)

Analizando los resultados obtenidos se puede apreciar que el caudal de 1440 [m^3/s] no entrega una solución satisfactoria, esto debido a que el aluvión pasa por sobre la villa, inundando una mayor área a los 700 [s] (ver Figura 5.17), por lo cual se descarta el uso de este caudal en otras simulaciones.

Si se observan los resultados con un caudal de 2070 [m^3/s] a los 500[s] (ver Figura 5.21), se nota una mejoría debido a que el aluvión no sobrepasa la villa, pero si se analiza lo que ocurre luego de 100 [s] sin caudal este si sobrepasa la villa (ver Figura 5.23), lo cual no ocurrió en la realidad.

Por último tenemos los resultados obtenidos con el caudal de 3456 [m^3/s] (ver Figura 5.25), los cuales se asemejan mucho más a lo ocurrido en Villa Santa Lucia, incluso luego de 100 [s] sin caudal (ver Figura 5.27), el desarrollo del escurrimiento se parece aún más a lo visto en la realidad. En base a esto último se decide que el mejor caudal es el de 3456 [m^3/s], lo cual coincide con lo mostrado en un estudio hecho por Sernageomin en el cual se estipula que el aluvión se movió a una velocidad promedio de 20 [m/s] [2].

Además cabe mencionar que el hecho de que sea un caudal mayor, provoca que la llegada del aluvión a la villa ocurra en un tiempo menor. Esto último coincide con los relatos hechos por las víctimas del aluvión, las cuales no tuvieron tiempo para escapar desde sus casas.

Para poder comparar estos resultados no solo de forma cualitativa, sino que también de forma cuantitativa, se analizará el área que abarca el escurrimiento, comparándola con lo ocurrido en la realidad. Para ello se generará un área aproximada a través de Google Earth como se muestra en la Figura 5.30

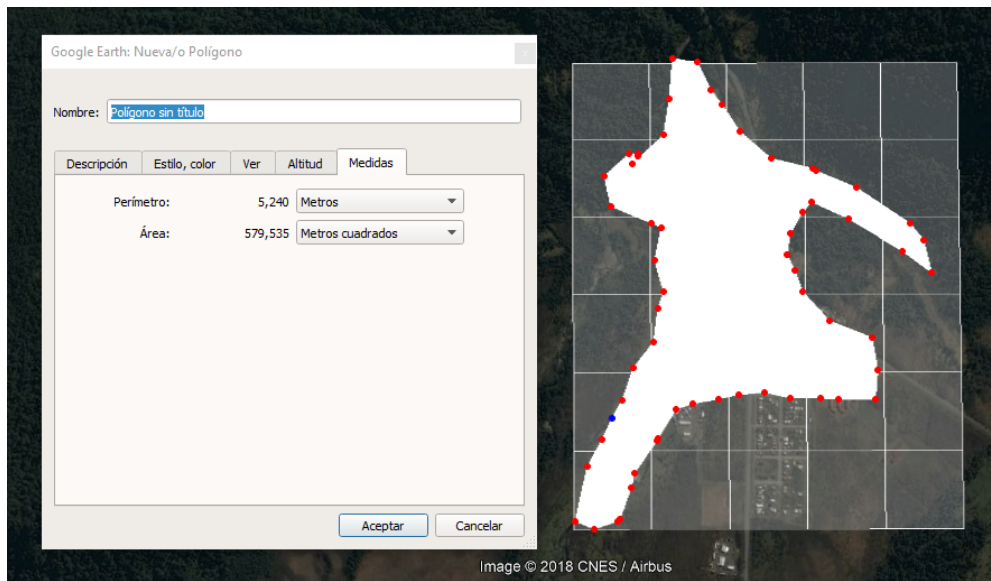


Figura 5.30: Área estimada de escurrimiento en la malla. Recuperado de Google Earth.

Cuadro 5.4: Estimación de área que abarca el escurrimiento

Caudal [m^3/s]	Fricción Variable	Tiempo [s]	Área de escurrimiento [m^2]
1440	0.1 y 0.2	700	606,898
1440	0.1 y 0.2	800 (100[s] s/q)	746,630
2070	0.1 y 0.2	500	521,058
2070	0.1 y 0.2	600 (100[s] s/q)	633,890
3456	0.1 y 0.2	300	423,369
3456	0.1 y 0.2	400 (100[s] s/q)	552,913
3456	0.1 y 0.2	500 (200[s] s/q)	689,142
Área estimada = 580,000 m^2			

De esta manera se logra visualizar de manera cuantitativa (ver Cuadro 5.4) que el caudal que más se acerca al área estimada es el de 3456 [m^3/s], lo cual coincide con el análisis cualitativo realizado previamente.

Adicionalmente se analizan largos característicos del aluvión, para de esta manera comparar las diferentes simulaciones. Para ello se escogieron cuatro largos característicos de interés (ver Figura 5.31) que describen de cierta manera la forma del escurrimiento.

Se analizan las siguientes distancias.

- **L1:** Distancia vertical del escurrimiento a la altura de la calle principal de villa Santa Lucia.
- **L2:** Distancia vertical del escurrimiento, la cual pasa por el termino de las calles perpendiculares a la calle principal.
- **L3:** Distancia horizontal del escurrimiento a una distancia de 1000[m], considerados desde el fondo de la malla.
- **L4:** Distancia horizontal del escurrimiento a una distancia de 200[m], considerados desde el fondo de la malla.

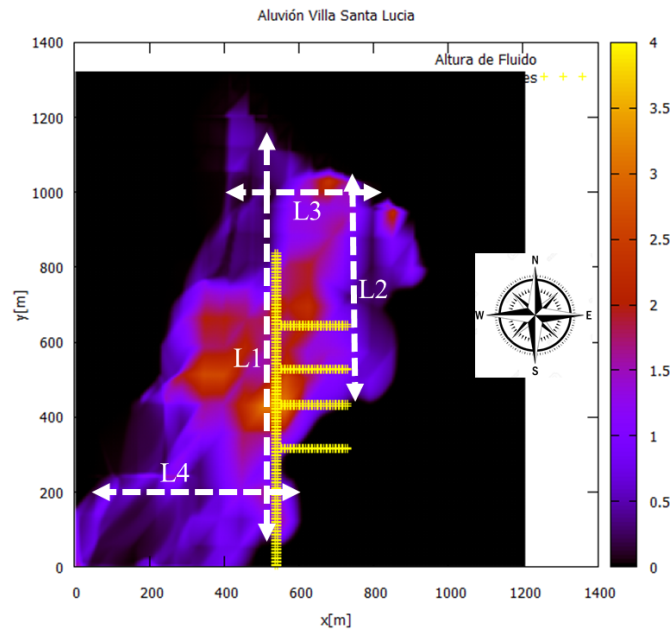


Figura 5.31: Largos característicos del aluvión.

A partir de las imágenes que dejó el paso del aluvión (ver Figura 4.3), se logran cuantificar estas medidas características, las cuales se muestran en el Cuadro 5.5 para la comparación de los valores obtenidos con las simulaciones.

Cuadro 5.5: Valores reales de largos característicos

L1	900 [m]
L2	750 [m]
L3	400 [m]
L4	400 [m]

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones (ver Cuadro 5.6) con las fricciones de 0.1 y 0.2 a diferentes caudales de entrada.

Cuadro 5.6: Largos característicos del aluvión

Caudal [m³/s]	Fricción Variable	Tiempo [s]	L1 [m]	L2 [m]	L3 [m]	L4 [m]
1440	0.1 y 0.2	700	1100	600	420	600
1440	0.1 y 0.2	800 (100[s] s/q)	1200	1020	400	850
2070	0.1 y 0.2	500	900	520	450	0
2070	0.1 y 0.2	600 (100[s] s/q)	1100	580	410	580
3456	0.1 y 0.2	300	720	440	520	0
3456	0.1 y 0.2	400 (100[s] s/q)	930	550	400	50
3456	0.1 y 0.2	500 (200[s] s/q)	1010	740	380	620

Los valores de L1 y L2 representan que tan lejos llegó el escurrimiento, lo cual se observa que para los caudales menores este sobrepasa la villa, lo cual no ocurrió en la realidad, no sucede así con el caudal de 3456 [m³/s], el cual se asemeja bastante al aluvión sucedido en villa Santa Lucia.

En cuanto al valor de L3 este se encuentra bien representado por los tres caudales, lo

cual no sucede con L4, el cual ninguno logra acercarse al valor planteado previamente, lo cual se debe a un ensanchamiento excesivo del escurrimiento en el extremo inferior de la malla.

Tomando en consideración que si bien el mayor caudal entrega mejores resultados, estos aun no son iguales a los ocurridos en Villa Santa Lucia (ver Figura 4.3), especialmente debido a lo que ocurre en la zona inferior de la malla. En esta zona se encuentra el río Burritos, por lo cual es recomendable realizar nuevas simulaciones cambiando algunos parámetros de interés.

Es por ello que se genera una nueva área con fricción variable, la cual corresponde al lecho del Río Burritos como se logra apreciar en la Figura 5.32. En esta zona se colocará una fricción menor, esto debido a que en esta zona se produce de manera permanente una circulación de agua, por lo cual se trabajaran con dos valores de fricción, uno de 0.01 y otro de 0.025.



Figura 5.32: Fricción variable de 0.01 (0.025) 0.1 y 0.2

A continuación se presentan los resultados con un caudal de $3456 \text{ [m}^3/\text{s]}$ después de 300 [s], en donde se utilizaran 3 fricciones distintas, una de ellas corresponde a la fricción de 0.1 en todo el dominio, la otra de 0,2 en zonas de casas y árboles y por ultimo una fricción de 0.025 en el lecho del río.

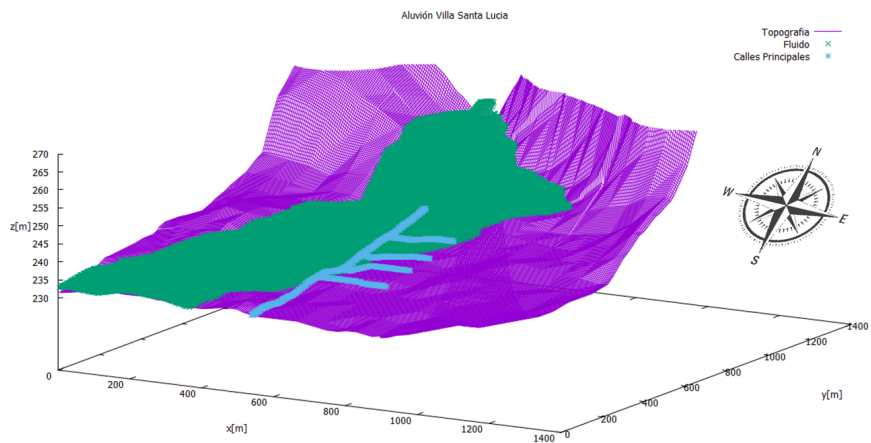


Figura 5.33: Esguerriminto con malla de 251x276 nodos y un caudal de $3456 \text{ [m}^3/\text{s]}$ después de 300 [s], con fricción de 0.025, 0.1 y 0.2

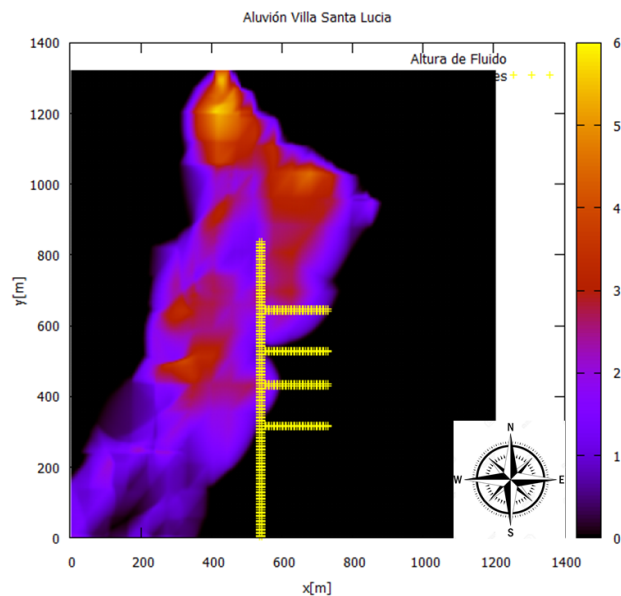


Figura 5.34: Esguerriminto con malla de 251x276 nodos y un caudal de $3456 \text{ [m}^3/\text{s]}$ después de 300 [s], con fricción de 0.025, 0.1 y 0.2 (Vista Superior)

Al igual que con las simulaciones anteriores, se siguió calculando sin la entrada de caudal por 100 [s], resultados que se presentan en las siguientes imágenes.

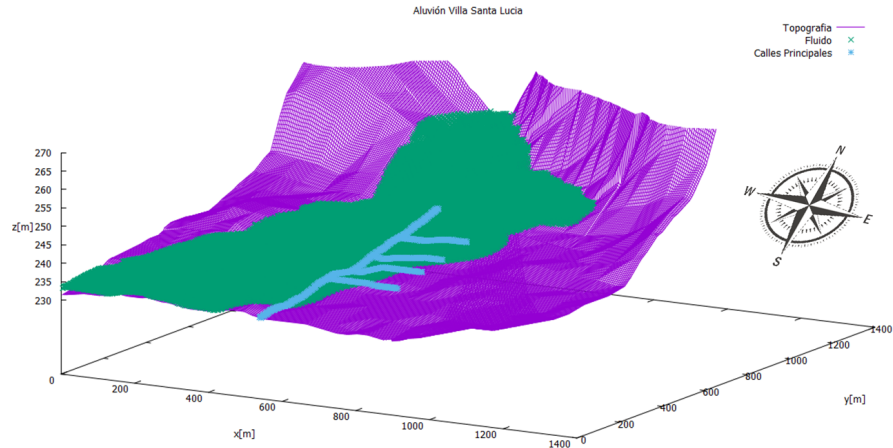


Figura 5.35: Esguerrimieuto con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m^3/s] después de 400 [s] (100[s] con caudal), con fricción de 0.025, 0.1 y 0.2

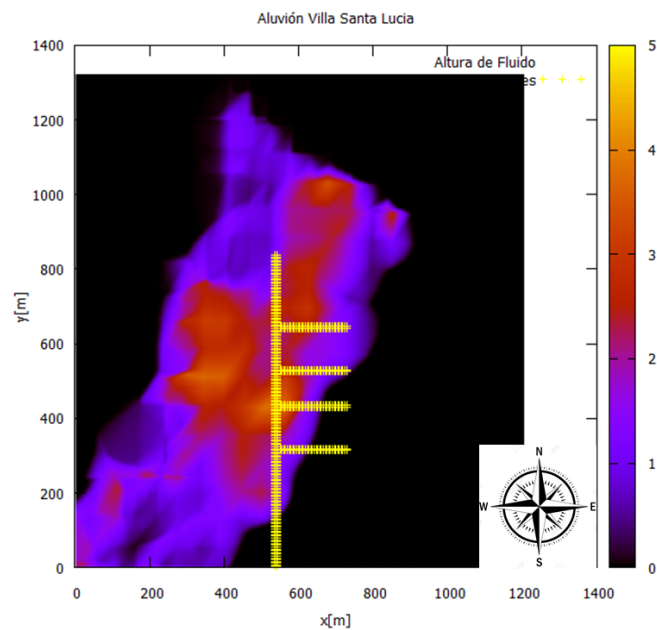


Figura 5.36: Esguerrimieuto con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m^3/s] después de 400 [s] (100[s] con caudal), con fricción de 0.025, 0.1 y 0.2 (Vista Superior)

A continuación se presentan los resultados luego de 500 [s], en donde los primeros 300 [s] se calculan con la entrada de caudal, mientras que los siguientes 200 [s] sin la entrada de este.

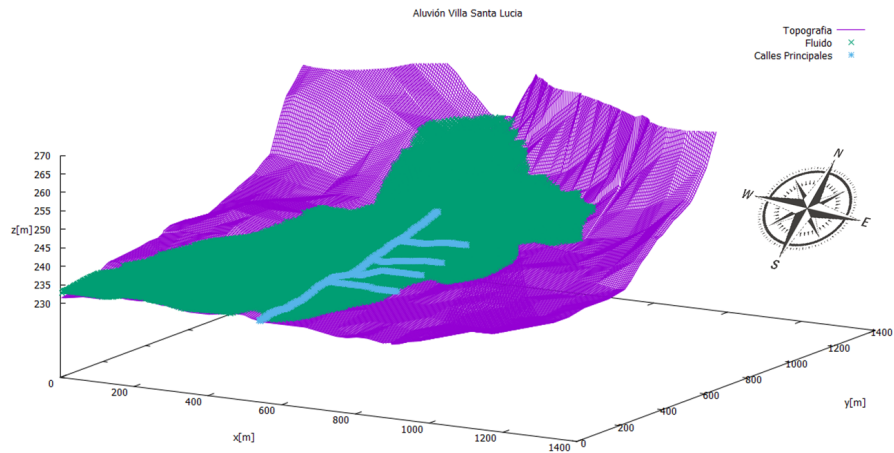


Figura 5.37: Esgurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m³/s] despu3s de 500 [s] (200[s] con caudal), con fricci3n de 0.025, 0.1 y 0.2

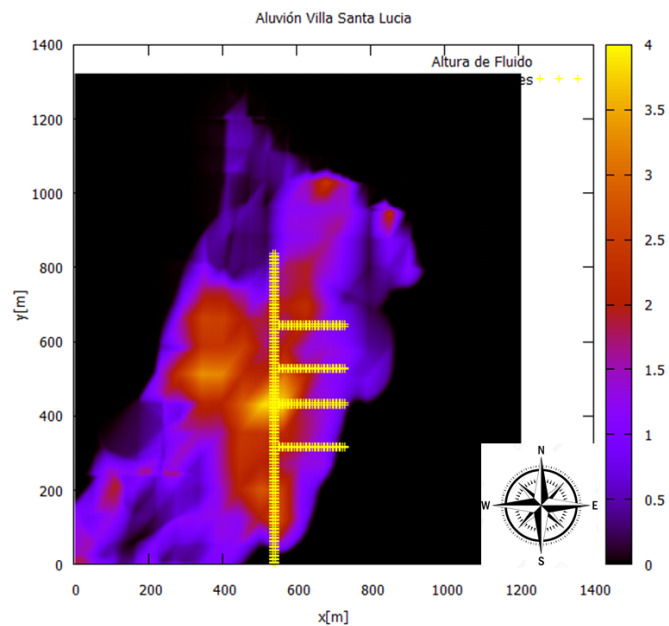


Figura 5.38: Esgurrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m³/s] despu3s de 500 [s] (200[s] con caudal), con fricci3n de 0.025, 0.1 y 0.2 (Vista Superior)

Posteriormente se realizó la misma simulación descrita anteriormente, pero cambiando la fricción del lecho del río desde 0.025 a 0.01 y manteniendo constantes las demás fricciones. Las siguientes imágenes muestran los resultados luego de 300[s]

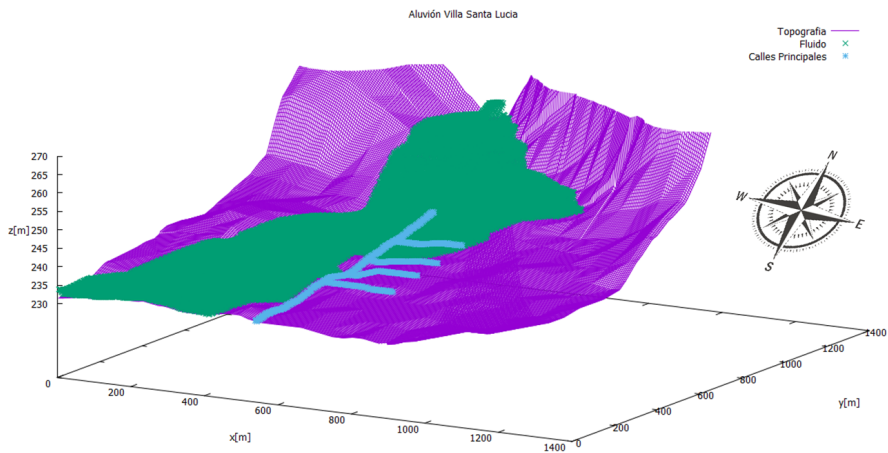


Figura 5.39: Esguerriminto con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m³/s] después de 300 [s], con fricción de 0.01, 0.1 y 0.2

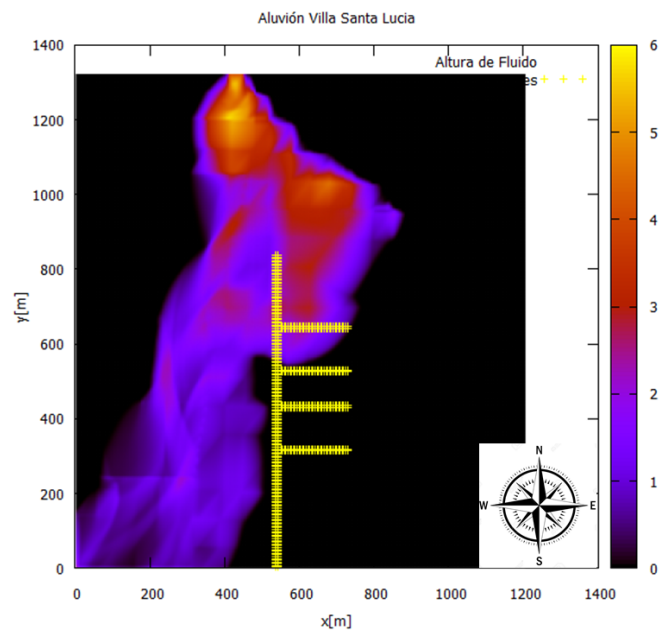


Figura 5.40: Esguerriminto con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m³/s] después de 300 [s], con fricción de 0.01, 0.1 y 0.2 (Vista Superior)

De manera análoga a lo hecho anteriormente se continuaron los cálculos otros 100[s] sin la entrada de caudal, cuyos resultados se muestran a continuación.

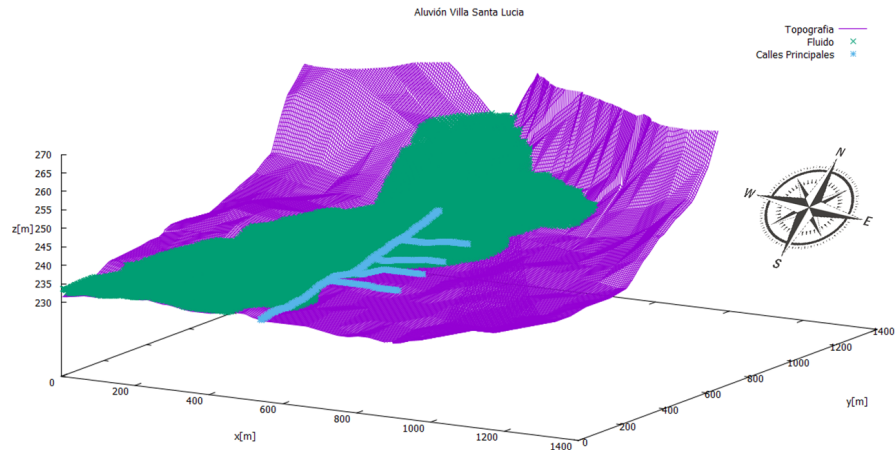


Figura 5.41: Esguerrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m^3/s] después de 400 [s] (100[s] con caudal), con fricción de 0.01, 0.1 y 0.2

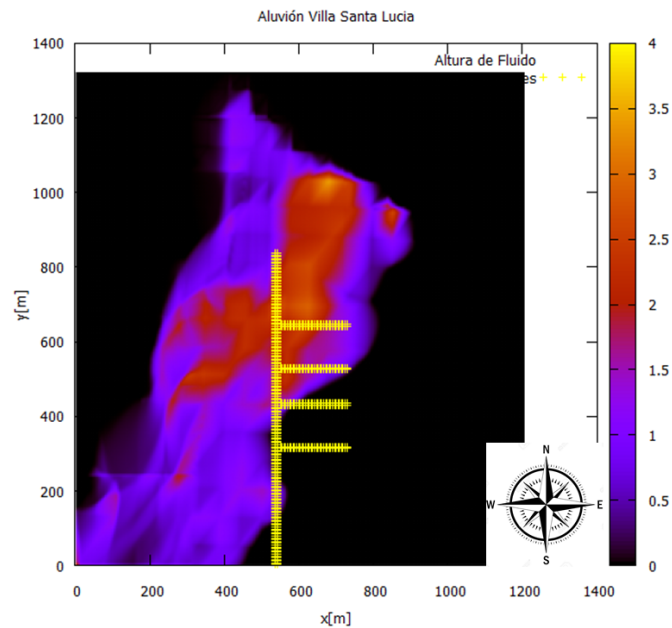


Figura 5.42: Esguerrimiento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m^3/s] después de 400 [s] (100[s] con caudal), con fricción de 0.01, 0.1 y 0.2 (Vista Superior)

Finalmente se realizó la simulación de 500 [s], con la fricción del lecho del río de 0,01, en donde los primeros 300 [s] son con la entrada de caudal, mientras que los siguientes 200 [s] son sin la entrada de este.

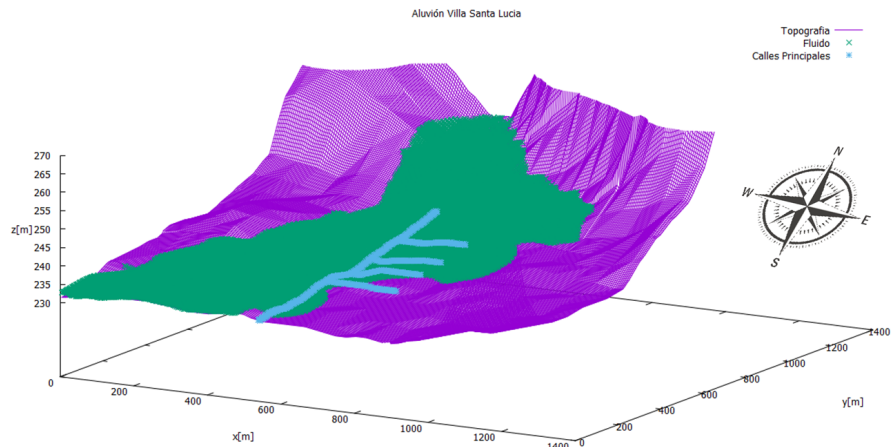


Figura 5.43: E scorrimento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m³/s] después de 500 [s] (200[s] con caudal), con fricción de 0.01, 0.1 y 0.2

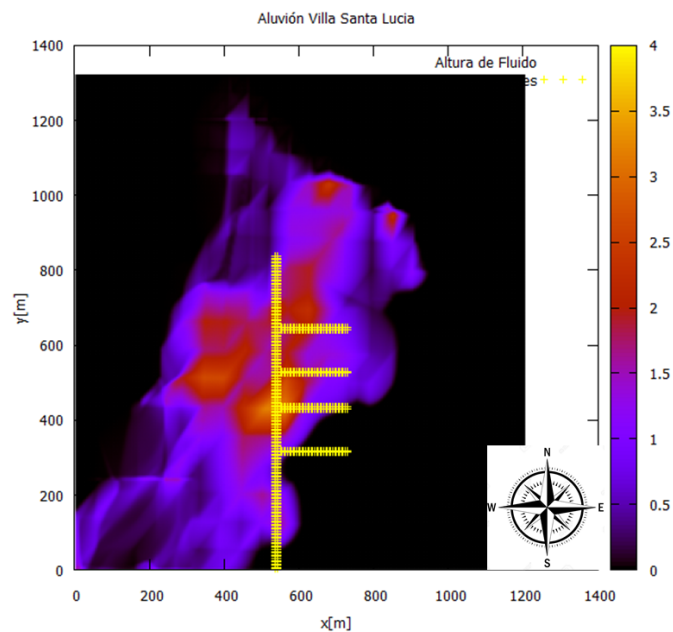


Figura 5.44: E scorrimento con malla de 251x276 nodos y un caudal de 3456 [m³/s] después de 500 [s] (200[s] con caudal), con fricción de 0.01, 0.1 y 0.2 (Vista Superior)

Analizando los resultados obtenidos en estas últimas simulaciones se logra apreciar una gran mejoría de estas, esto se debe a la inclusión de una fricción menor en el lecho del río. Esto genera que la mayor parte del caudal siga el curso de este, y solo una parte quede depositado en Villa Santa Lucia, lo cual ocurrió en la realidad.

Realizando el mismo análisis cuantitativo hecho previamente, se obtienen los siguientes resultados para las dos simulaciones hechas, los cuales se resumen en el Cuadro 5.7.

Cuadro 5.7: Estimación de área que abarca el escurrimiento

Caudal [m^3/s]	Fricción Variable	Tiempo [s]	Área de escurrimiento [m^2]
3456	0.025, 0.1 y 0.2	300	565,246
3456	0.025, 0.1 y 0.2	400 (100[s] s/q)	632,000
3456	0.025, 0.1 y 0.2	500 (200[s] s/q)	676,165
3456	0.01, 0.1 y 0.2	300	544,500
3456	0.01, 0.1 y 0.2	400 (100[s] s/q)	603,048
3456	0.01, 0.1 y 0.2	500 (200[s] s/q)	626,260
Área estimada = 580,000 m^2			

En base a los resultados se puede observar una importante mejoría respecto a las simulaciones anteriores, lo cual se debe solamente a la zona de baja fricción presente en el río, abarcando una área menor y mucho más cercana a la observada en el aluvión.

Realizando el mismo análisis de largos característicos del aluvión se obtienen los resultados que se muestran en el cuadro 5.8, los cuales se comparan con los mostrados en el cuadro 5.5.

Cuadro 5.8: Largos característicos del aluvión

Caudal [m³/s]	Fricción Variable	Tiempo [s]	L1 [m]	L2 [m]	L3 [m]	L4 [m]
3456	0.025, 0.1 y 0.2	300	850	410	470	410
3456	0.025, 0.1 y 0.2	400 (100[s] s/q)	1020	510	410	600
3456	0.025, 0.1 y 0.2	500 (200[s] s/q)	1120	600	400	660
3456	0.01, 0.1 y 0.2	300	620	450	470	460
3456	0.01, 0.1 y 0.2	400 (100[s] s/q)	890	620	400	520
3456	0.01, 0.1 y 0.2	500 (200[s] s/q)	1100	610	400	570

Analizando el valor de L4, el cual era el largo característico que no se acercaba a los valores reales del escurrimiento, ahora este se acerca mucho más y se nota una mejoría importante, lo cual se debe exclusivamente a la baja fricción impuesta en el lecho del río.

Si bien la fricción de 0.01 funciona mejor tanto a nivel cuantitativo como cualitativo, es importante mencionar que esta se encuentra en el limite inferior de la tabla presentada al inicio del trabajo. Por lo cual la fricción de 0.025 representa mejor las condiciones físicas presentes en la zona.

Capítulo 6

Conclusiones

En base a los análisis de resultados, es posible concluir que las ecuaciones de shallow water son una buena aproximación para el fenómeno de escurrimiento de un aluvión. La rapidez y simplicidad que presentan al momento de resolverlas, las hacen una herramienta muy útil al momento de analizar esta clase de fenómenos.

Además, se logró mostrar los parámetros físicos más relevantes de un aluvión, los cuales son el caudal, la velocidad de entrada y la fricción del suelo. La fricción genera los mayores cambios en los resultados, tanto en las situaciones en donde se coloca una fricción mayor como casas y árboles, como en las situaciones con zonas de baja fricción como el lecho del río.

De igual manera se pudo crear un código que sea capaz de leer la información recopilada de Google Earth, que a pesar de lo robusta que pueda ser la data obtenida de este software, se logran crear mallas de diferentes tamaños que se ajustan bastante bien a lo observado en la realidad.

Aunque no se logra replicar de manera exacta lo ocurrido en Villa Santa Lucía, los resultados se asemejan bastante a lo sucedido, estos errores se pueden deber a zonas que poseen mayor fricción, como los son los bosques. Otro error se debe al efecto acumulativo del arrastre de casas y árboles que terminando frenando el flujo, y el cual

no se modela en las simulaciones.

Por ultimo cabe recordar que se trabaja con agua como fluido, por lo cual el modelo no es el todo exacto, ya que un aluvión consiste más bien en barro, que además transporta diversos materiales diluidos y no diluidos en su interior, por lo cual lo planteado en este trabajo es una aproximación que busca ser lo más exacta posible.

Si bien se obtuvieron resultados interesantes respecto a a la modelación de aluviones a través de las ecuaciones de shallow water, aún queda abierta la posibilidad para trabajos futuros. En los cuales se busquen validar los resultados obtenidos con otros aluviones de mayor magnitud ocurridos en Chile, y al mismo tiempo intentar afinar aún más los resultados variando la fricción del suelo, las condiciones de entrada y las propiedades del fluido.

Bibliografía

- [1] Olivier Delestre, Frédéric Darboux, Francois James, Carine Lucas, Christian Laguerre, and Stephane Cordier. Fullswof: A free software package for the simulation of shallow water flows. *arXiv preprint arXiv:1401.4125*, 2014.
- [2] Servicio Nacional de Geología y Minería. Informe aluvión Villa Santa Lucia. Recuperado de <http://www.sernageomin.cl/aluvion-villa-santa-lucia/>.
- [3] Ven Te Chow. *Open-channel hydraulics*, volume 1. McGraw-Hill New York, 1959.
- [4] U Gruber and P Bartelt. Snow avalanche hazard modelling of large areas using shallow water numerical methods and gis. *Environmental Modelling & Software*, 22(10):1472–1481, 2007.
- [5] Abdul Hadi, Muhammad Salihi, Mohd Zaini Mustapa, and Shahbudin Saad. Complete derivation of 2d shallow-water model from the primitive equations governing geophysical flows. 2012.
- [6] Iain G Currie and IG Currie. *Fundamental mechanics of fluids*. Crc Press, 2002.
- [7] Alexander H-D Cheng and Daisy T Cheng. Heritage and early history of the boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 29(3):268–302, 2005.
- [8] Peter D Lax. Weak solutions of nonlinear hyperbolic equations and their nume-

- rical computation. *Communications on pure and applied mathematics*, 7(1):159–193, 1954.
- [9] Peter Lax and Burton Wendroff. Systems of conservation laws. *Communications on Pure and Applied mathematics*, 13(2):217–237, 1960.
- [10] Sergei Konstantinovich Godunov. A difference scheme for numerical solution of discontinuous solution of hydrodynamic equations. *Math. Sbornik*, 47:271–306, 1959.
- [11] Bram Van Leer. Towards the ultimate conservative difference scheme. *Journal of Computational Physics*, 135(2):229–248, 1997.
- [12] Philip L Roe. Characteristic-based schemes for the euler equations. *Annual review of fluid mechanics*, 18(1):337–365, 1986.
- [13] Randall J Leveque. Clawpack: A software package for solving multi-dimensional conservation laws. In *Proc. 5th Intl. Conf. Hyperbolic Problems*, pages 188–197. Citeseer, 1994.
- [14] Stéphane Popinet. Quadtree-adaptive tsunami modelling. *Ocean Dynamics*, 61(9):1261–1285, 2011.
- [15] Marc Honnorat, François-Xavier Le Dimet, Youssef Loukili, and Jérôme Monnier. *Dassflow: a direct and adjoint model for 2d shallow water flows*. PhD thesis, INRIA, 2005.
- [16] Richard M Iverson, Mark E Reid, and Richard G LaHusen. Debris-flow mobilization from landslides. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25(1):85–138, 1997.
- [17] IPCC Adopted. Climate change 2014 synthesis report. 2014.

- [18] Gabriel Vargas, Luc Ortlieb, and José Rutllant. Aluviones históricos en antofagasta y su relación con eventos el niño/oscilación del sur. *Revista geológica de Chile*, 27(2):157–176, 2000.
- [19] Olivier Delestre, Carine Lucas, Pierre-Antoine Ksinant, Frédéric Darboux, Christian Laguerre, T-N-Tuoi Vo, Francois James, and Stéphane Cordier. Swashes: a compilation of shallow water analytic solutions for hydraulic and environmental studies. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 72(3):269–300, 2013.
- [20] Russell G Mein and Curtis L Larson. Modeling infiltration during a steady rain. *Water resources research*, 9(2):384–394, 1973.
- [21] Marie-Odile Bristeau and Benoit Coussin. *Boundary conditions for the shallow water equations solved by kinetic schemes*. PhD thesis, INRIA, 2001.
- [22] Jorge E Romero. La erupción del volcán chaitén en 2008: Resumen gráfico de su cronología y efectos. *Educación*, 2018.
- [23] Manuel Stuardo. Confirman hallazgo de la víctima número 21 en Villa Santa Lucía. Recuperado de <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-de-los-lagos/2018/03/16/confirman-hallazgo-de-la-victima-numero-22-en-villa-santa-lucia.shtml>.
- [24] Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública. Declaración zona de exclusión. <http://www.onemi.cl/noticia/autoridades-establecen-zona-de-exclusion-y-mantiene-evacuacion-preventiva-de-villa-santa-lucia/>.

Anexos

Anexo A: Código para generación de malla

```
1
2 # coding: utf-8
3
4 # In [2]:
5
6
7 import numpy
8
9
10 # In [3]:
11
12
13 ny = 52 #Nodos en eje y
14 nx = 51 #Nodos en eje x
15
16 my = 6 #Mallas en eje y
17 mx = 5 #Mallas en eje x
18
19 mm = mx*my # Numero de submallas
20
21 N = ((my-1)*(ny-2)+ny)*(nx-1)
22
23
```

```

24 # In[4]:
25
26
27 z=""
28 for i in range(30):
29     z += "malla"+str(i+1)+".XML"+" "
30
31
32 # In[5]:
33
34
35 j1=ny-1
36 i1=nx-1
37 k1=my-1
38 h1=mx-1
39 puntos=j1+(my*(ny-2)+2)*i1+k1*(ny-2)+h1*N
40
41
42 # In[6]:
43
44
45 mallafinal=numpy.zeros(puntos+1)
46 for h in range(mx):
47     print h
48     if h==(mx-1):
49         for k in range(my):
50             if k==(my-1):
51                 for i in range(nx):
52                     for j in range(ny):
53                         m1 = i*ny+j #Malla[i]
54                         m2 = j+(my*(ny-2)+2)*i+k*(ny-2)+h*N #Z[i]
55                         m3 = k+(my*h) #Mallai
56                         malla = z.split(" ")[m3]
57                         fmalla = open(malla, 'r')

```

```

58         zmall = fmall.readlines()
59         mallafinal[m2] = zmall[1].split(" ")[38+3*m1
][0:10]
60         fmall.close()
61     else:
62         for i in range(nx):
63             for j in range(ny-2):
64                 m1 = i*ny+j #Malla[i]
65                 m2 = j+(my*(ny-2)+2)*i+k*(ny-2)+h*N #Z[i]
66                 m3 = k+(my*h) #Mallai
67                 malla = z.split(" ")[m3]
68                 fmall = open(malla, 'r')
69                 zmall = fmall.readlines()
70                 mallafinal[m2] = zmall[1].split(" ")[38+3*m1
][0:10]
71                 fmall.close()
72     else:
73         for k in range(my):
74             if k==(my-1):
75                 for i in range(nx-1):
76                     for j in range(ny):
77                         m1 = i*ny+j #Malla[i]
78                         m2 = j+(my*(ny-2)+2)*i+k*(ny-2)+h*N #Z[i]
79                         m3 = k+(my*h) #Mallai
80                         malla = z.split(" ")[m3]
81                         fmall = open(malla, 'r')
82                         zmall = fmall.readlines()
83                         mallafinal[m2] = zmall[1].split(" ")[38+3*m1
][0:10]
84                         fmall.close()
85     else:
86         for i in range(nx-1):
87             for j in range(ny-2):
88                 m1 = i*ny+j #Malla[i]

```

```

89         m2 = j+(my*(ny-2)+2)*i+k*(ny-2)+h*N #Z[i]
90         m3 = k+(my*h) #Mallai
91         malla = z.split(" ")[m3]
92         fmalla = open(malla, 'r')
93         zmalla = fmalla.readlines()
94         mallafinal[m2] = zmalla[1].split(" ")[38+3*m1
    ][0:10]
95         fmalla.close()
96
97
98 # In [7]:
99
100
101 Ny = 276
102 Nx = 251
103 mallafinal2=numpy.zeros(69276)
104 for i in range(Nx):
105     for j in range(Ny):
106         mallafinal2[i*Ny+j]=mallafinal[(i*(Ny+26))+j]
107
108
109 # In [8]:
110
111
112 Ly = 1325.
113 Ny = 276
114 Lx = 1208.
115 Nx = 251
116 hy = Ly/Ny
117 hx = Lx/Nx
118 m = numpy.linspace(hy/2, Ly-hy/2, num=Ny, endpoint=True)
119 n = numpy.linspace(hx/2, Lx-hx/2, num=Nx, endpoint=True)
120
121 f = open("topography.dat","w")

```

```

122 for i in range(Nx):
123     for j in range(Ny):
124         f.write("%1.4f\t%1.4f\t%1.8f\n"%(n[i], m[j], mallafinal2[i*Ny
+ j]))
125     f.write("\n")
126
127 f.close()
128
129
130 # In[9]:
131
132
133 f = open("huv_init.dat","w")#Archivo Altura Inicial
134 for i in range(Nx):
135     for j in range(Ny):
136         if j>600: factor=1.
137         else: factor = 0
138         f.write("%1.4f\t%1.4f\t%1.4f\t%1.4f\t%1.8f\n"%(n[i], m[j],
0,0,0))
139     f.write("\n")
140
141 f.close()
142
143
144 # In[10]:
145
146
147 f=open("frontera.txt","w")#Archivo Condiciones de Frontera
148 for j in range(Nx):
149     if 84<j<94: factor=1.
150     else: factor = 0.
151     f.write("%1.4f\t%1.0f\t%1.4f\t%1.4f\n"%(n[j],1, factor*(-160.0),
factor*4.0))
152 f.close()

```

```

153
154
155 # In[11]:
156
157
158 f = open("calle150ef.dat","w")#Archivo Calles Principales
159 for i in range(Nx):
160     for j in range(Ny):
161         if 110<i<113 and j<175: factor=1.
162         elif 113<i<152 and 64<j<67: factor=1.
163         elif 113<i<152 and 88<j<91: factor=1.
164         elif 113<i<152 and 108<j<111: factor=1.
165         elif 113<i<152 and 132<j<135: factor=1.
166         else: factor = 0
167         f.write("%1.4f\t%1.4f\t%1.8f\n"%(n[i], m[j], factor*
168         mallafinal2[i*Ny+j]))
169         f.write("\n")
170
171 f.close()
172
173 # In[12]:
174
175
176 f = open("friccion4.dat","w") #Archivo Fricci n Variable
177 for i in range(Nx):
178     for j in range(Ny):
179         if i <=135:
180             if 83<i<158 and 50<=j <145: factor=0.2
181             elif 83<i<158 and 0<=j <50: factor=0.2
182             else: factor=0.1
183         if i >135:
184             m1=(102.-161)/(251-135)
185             m2=(200.-229)/(251-135)

```

```

186     j1=int(161+m1*(i-135))
187     j2=int(229+m2*(i-135))
188     if 83<i<158 and 50<=j<145: factor=0.2
189     elif 83<i<158 and 0<=j<50: factor=0.2
190     elif j1<=j<=j2: factor=0.2
191     else: factor=0.1
192     if 50<j<220:
193         m3=(65-0)/(220.-50)
194         m4=(95-50)/(220.-50)
195         i1=int(0+m3*(j-50))
196         i2=int(50+m4*(j-50))
197         if i1<=i<=i2: factor=0.025
198         if 0<j<50 and 0<i<50: factor=0.025
199         f.write("%1.4f\t%1.4f\t%1.8f\n"%(n[i], m[j], factor))
200     f.write("\n")
201
202 f.close()

```

Anexo B: Código para gráficos y valores promedios

```

1
2 # coding: utf-8
3
4 # In[1]:
5
6
7 import numpy
8
9
10 # In[2]:
11
12
13 #Malla 150 Extendida

```

```

14 Ny=276
15 Nx=251
16 NN=Nx*Ny
17 malla1 = numpy.zeros(NN)
18 malla2 = numpy.zeros(NN)
19 malla3 = numpy.zeros(NN)
20
21 fmalla = open('huz_final150ef.dat', 'r')
22 zmalla = fmalla.readlines()
23 for i in range(Nx):
24     for j in range(Ny):
25         dx=float(zmalla[6+i*(Ny+1)+j].split("\t")[0])
26         dy=float(zmalla[6+i*(Ny+1)+j].split("\t")[1])
27         hh=float(zmalla[6+i*(Ny+1)+j].split("\t")[2])
28         hz=float(zmalla[6+i*(Ny+1)+j].split("\t")[5])
29         malla1[i*Ny+j]=dx
30         malla2[i*Ny+j]=dy
31         if hh>0.001:
32             malla3[i*Ny+j]=hz
33 fmalla.close()
34
35 f = open("huz_final15ef.dat","w")
36 for i in range(Ny):
37     for j in range(Nx):
38         f.write("%1.4f\t%1.4f\t%1.4f\n"%(malla1[i*Nx+j], malla2[i*Nx+
39         j],malla3[i*Nx+j] ))
40     f.write("\n")
41 f.close()
42
43 # In [3]:
44
45
46 #Malla 150 Extendida

```

```

47 Ny=276
48 Nx=251
49 NN=Nx*Ny
50 dx=4.8013
51 dy=4.8009
52 promv = 0
53 promh = 0
54 fmall = open('huz_final150ef.dat', 'r')
55 zmall = fmall.readlines()
56 for i in range(Nx):
57     for j in range(Ny):
58         hh=float(zmall[6+i*(Ny+1)+j].split("\t")[2])
59         hz=float(zmall[6+i*(Ny+1)+j].split("\t")[5])
60         promh=promh+hh
61         promv=promv+(hh*dx*dy)
62 print "Altura Promedio=" ,(promh/NN)
63 print "Volumen=" ,promv
64
65
66 fmall.close()

```

Anexo C: Código para estimar área de escurrimiento

```

1
2 # coding: utf-8
3
4 # In[13]:
5
6
7 import numpy
8
9
10 # In[14]:

```

```

11
12
13 #Malla150
14 Ny=276
15 Nx=251
16 NN=Nx*Ny
17 dx=4.8013
18 dy=4.8009
19 promv = 0
20 promh = 0
21 fmalla = open('huz_final150ef.dat', 'r')
22 zmall = fmalla.readlines()
23 suma = 0.
24 for i in range(Nx):
25     for j in range(Ny):
26         hh=float(zmall[6+i*(Ny+1)+j].split("\t")[2])
27         hz=float(zmall[6+i*(Ny+1)+j].split("\t")[5])
28         if hh>0.01:
29             suma=suma+1
30 promv=(suma*dx*dy)
31 print "Area=",promv
32
33
34 fmalla.close()

```