



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

ANÁLISIS DE REPRESENTATIVIDAD DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS MEDIANTE
UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN TECNOLOGÍAS DE
INFORMACIÓN

YULY MARGARITA BOTINA MUÑOZ

PROFESOR GUÍA
NANCY HITSCHFELD KAHLER
PROFESOR CO-GUÍA.
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
MÓNICA VILLANUEVA ILUFI
MARÍA CECILIA RIVARA ZUÑIGA
NELSON BALOIAN TATARYAN

SANTIAGO DE CHILE
2014

Resumen

Hidrológicamente, la cuenca funciona como un gran colector que recibe las precipitaciones y las transforma en escurrimientos, esta acción es función de una gran cantidad de parámetros que influyen en el comportamiento hidrológico de la cuenca. A la fecha se ha comprobado que algunos índices y características tienen influencia en la respuesta hidrológica de la misma (Campo Aranda, 1998), y por ello, son punto de partida de los análisis hidrológicos que se realicen de la cuenca. Las características físicas de la cuenca y la mayor parte del comportamiento hidrológico se encuentran influenciadas por la topografía, pues a mayores pendientes corresponden mayores velocidades de las corrientes de agua y menor será el tiempo de concentración de la cuenca, además la diferencia de altitudes determina la temperatura y la precipitación del lugar (Llamas, 1993).

El presente trabajo está enfocado en el estudio y análisis hidrológico de una cuenca hidrográfica a partir de las características fisiográficas de la forma y relieve, debido a que estas propiedades o características influyen de manera decisiva en su respuesta hidrológica. Para llevar a cabo el estudio y análisis de la cuenca se diseña e implementa un software que permite procesar el conjunto de características comunes: pendiente, elevación, usos de suelo y orientación del terreno, a través de las cuales se realiza el cálculo de las unidades de respuesta hidrológica, que son porciones del territorio de la cuenca con un similar comportamiento hidrológico.

La metodología en este desarrollo inicia a partir del modelo digital del terreno, el cual se procesa en una red irregular de triángulos construida con la triangulación de Delaunay. Se utiliza la red irregular de triángulos porque permite análisis espacial tal como: cálculo de elevación, pendiente, aspecto, cálculo de volumen, perfiles; en la herramienta desarrollada, mediante cálculos matemáticos sobre los datos de la red irregular de triángulos se obtienen los parámetros morfométricos de forma y relieve; para los parámetros de forma, se utiliza la información referente a los usos del suelo; para el relieve, se calcularon: las pendientes del terreno, las bandas de elevación, las curvas de nivel y la orientación del terreno; apoyados en los cálculos de las características físicas de la zona de estudio, se construyen las unidades de respuesta hidrológica que se forman usualmente por áreas dispersas, desconectadas entre sí, pero que mantienen propiedades comunes de especial importancia hidrológica, como son:

- ◆ Pendiente: que determina la velocidad de la escorrentía superficial.
- ◆ Elevación: el volumen de precipitación varía con la altura.
- ◆ Usos de suelo: tipo de vegetación de la zona de estudio.
- ◆ Orientación del terreno: determina la manera cómo influye el sol en el terreno.

El software construido permite simplificar las tareas relacionadas con el modelamiento del terreno dado que facilita la obtención del modelo digital del terreno a partir de Google Earth como fuente externa, además permite configurar y crear automáticamente el conjunto de vistas asociadas a las bandas de elevación del terreno, el mapa de pendientes y el mapa de orientación del terreno que representan junto con los usos del suelo las propiedades comunes a utilizar en el cálculo de las unidades de respuesta hidrográfica y por medio de éstas analizar y/o evaluar el grado de representatividad de la cuenca.

Dedicatoria

*A Dios por permitirme estar en este mundo.
A mi madre por su amor, esfuerzo y paciencia.
A mis hermanas por su amor, colaboración y sabios consejos.
A mis sobrinos Juli, Luisa, Migue, por ser fuente de muchas alegrías.
Al Ingeniero Efraín Solano por sus consejos, orientación, aportes y colaboración.*

Yuly

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE UNA CUENCA.....	4
1.1.1. <i>Cuenca</i>	4
1.1.1.1. Cuenca Hidrográfica	4
1.1.1.2. Cuenca Hidrológica	5
1.1.2. <i>Divisoria de aguas</i>	6
1.1.3. <i>Comportamiento Hidrológico</i>	6
1.1.4. <i>Unidades de Respuesta Hidrológica</i>	6
1.2. MODELAMIENTO DIGITAL DEL TERRENO.....	11
1.2.1. <i>Modelo Digital de Terreno</i>	11
1.2.1.1. Características de los modelos digitales de terreno (Felicísimo 1994):.....	12
1.2.1.2. Arquitectura de un modelo digital de terreno	12
1.2.2. <i>Red Irregular de Triángulos</i>	13
1.2.2.1. Definición de una Red Irregular de Triángulos	13
1.2.2.2. Creación de una Red Irregular de Triángulos	13
1.2.3. <i>Triangulación de Delaunay</i>	14
1.2.3.1. Propiedades Triangulación de Delaunay	14
1.2.4. <i>Curvas de Nivel</i>	16
1.2.5. <i>Pendiente</i>	16
1.2.6. <i>Usos de suelo</i>	17
1.2.7. <i>Orientación de terreno</i>	17
CAPÍTULO 2 MODELO CONCEPTUAL Y METODOLÓGICO	18
2.1. MODELO CONCEPTUAL	18
2.2. MODELO METODOLÓGICO.....	20
2.2.1. <i>Metodología de trabajo</i>	21
2.2.1.1. Creación de una Red Irregular de Triángulos	21
2.2.1.2. Curvas de Nivel o Isolíneas	23
2.2.1.3. Pendiente	23
2.2.1.4. Usos de suelo	24
2.2.1.5. Orientación del terreno.....	24
2.2.1.6. Unidades de Respuesta Hidrológica	26
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISEÑO.....	27
3.1. METODOLOGÍA DE DESARROLLO DE SOFTWARE	27
3.1.1. <i>Modelo Iterativo e Incremental</i>	27
3.1.2. <i>Programación Extrema (XP)</i>	28
3.2. ETAPAS INICIALES - METODOLOGÍA.....	28
3.2.1. <i>Captura de Requerimientos</i>	28
3.2.1.1. Usuario	28
3.2.1.2. Sistema.....	29
3.2.2. <i>Casos de Uso</i>	29
3.2.2.1. Actores	29
3.2.2.2. Escenarios	29
3.2.2.3. Diagrama General de Casos de Uso	29

3.3.	ETAPA DE DISEÑO - METODOLOGÍA	30
3.3.1.	Algoritmos	31
3.3.2.	Algoritmo de la Triangulación de Delaunay	31
3.3.3.	Refinamiento de los puntos del Río	32
3.3.4.	Calcular Divisoria de Aguas	33
3.3.5.	Calcular Pendientes del Terreno	33
3.3.6.	Calcular Orientación del Terreno	33
3.3.7.	Calcular Río	34
3.4.	ETAPA DE IMPLEMENTACIÓN - METODOLOGÍA	34
3.4.1.	Algoritmo Triangulación de Delaunay	34
3.4.2.	Algoritmo Divisoria de Aguas	36
3.4.3.	Algoritmo Pendiente del Terreno	37
3.4.4.	Algoritmo Orientación del Terreno	38
3.4.5.	Algoritmo Uso de Suelo	39
3.4.6.	Algoritmo Cálculo del Río	40
3.5.	HERRAMIENTAS EXTERNAS UTILIZADAS	41
3.5.1.	Google Earth	41
3.5.2.	Topo3	41
CAPÍTULO 4 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE		42
4.1.	MODELO DIGITAL DEL TERRENO	42
4.1.1.	Archivo plano	42
4.1.2.	Google Earth	42
4.1.2.1.	Ruta Río	44
4.1.2.2.	Modelo digital del terreno a partir de Google Earth	45
4.1.2.3.	Visualización del modelo digital del terreno	45
4.1.2.4.	Visualización del Río en el Modelo Digital del Terreno	46
4.1.2.5.	Funcionalidades sobre el Río en el Modelo Digital del Terreno	50
4.1.3.	Curvas de nivel o Isolíneas	51
4.1.4.	Uso de Suelo	52
4.1.5.	Bandas de Elevación	53
4.1.6.	Pendiente	54
4.1.7.	Orientación del terreno	55
4.1.8.	Unidades de Respuesta Hidrológica	56
4.1.9.	Divisoria de Aguas	57
CAPÍTULO 5 RESULTADOS OBTENIDOS.....		60
5.1.	ZONA DE ESTUDIO	60
5.2.	MODELO DIGITAL DEL TERRENO DE LA ZONA DE ESTUDIO	62
5.2.1.	Escenario 1: Modelo digital del terreno con 10000 puntos	62
5.2.1.1.	Curvas de Nivel	63
5.2.1.2.	Bandas de Elevación	68
5.2.1.3.	Mapa de Pendientes	69
5.2.1.4.	Orientación del Terreno	70
5.2.2.	Escenario 2: Modelo digital del terreno con 25 puntos	71
5.2.2.1.	Curvas de Nivel	72
5.2.2.2.	Bandas de Elevación	77
5.2.2.3.	Mapa de Pendientes	78
5.2.2.4.	Orientación del Terreno	79

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
6.1. CONCLUSIONES	80
6.2. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	81
GLOSARIO	82
BIBLIOGRAFÍA	83
ANEXOS	84

Índice de Tablas

Tabla 1.	Sintaxis pendiente mediante la calculadora ráster	9
Tabla 2.	Clasificación mapa de pendientes	54
Tabla 3.	Orientación del terreno	55

Índice de Figuras

Figura 1.	Partes de una cuenca hidrográfica	5
Figura 2.	Zonas de funcionamiento hídrico de una cuenca.....	5
Figura 3.	Esquema del modelo SWAT.....	8
Figura 4.	Opción Calculadora Ráster en Arc Gis	8
Figura 5.	Calculadora Ráster en Arc Gis	9
Figura 6.	Sintaxis para calcular la pendiente en la Calculadora Ráster.....	10
Figura 7.	Pendiente calculada mediante la Calculadora Ráster.....	10
Figura 8.	Pendiente en rango de colores	11
Figura 9.	Propiedad 1 - Triangulación de Delaunay.....	15
Figura 10.	Propiedad 2 - Triangulación de Delaunay	16
Figura 11.	Algunos conceptos del modelado de cuencas hidrográficas	19
Figura 12.	Creación de una TIN.....	21
Figura 13.	Triangulación de Delaunay en la creación de la TIN	22
Figura 14.	Intercambio de diagonales.....	22
Figura 15.	Cálculo de la pendiente del terreno	23
Figura 16.	Uso del uso – Región de Valparaíso, Sistema Territorial de Chile	24
Figura 17.	Cálculo de la orientación del terreno.....	25
Figura 18.	Orientación del terreno – Rosa de los vientos.....	25
Figura 19.	Modelo Iterativo e Incremental.....	27
Figura 20.	Diagrama general de casos de uso.....	30
Figura 21.	Diagrama de clases Triangulación de Delaunay	36
Figura 22.	Máximo ángulo pendiente del terreno	37
Figura 23.	Área del triángulo por determinantes	37
Figura 24.	Área del triángulo por vectores	37
Figura 25.	Rosa de los vientos para la dirección del terreno.....	39
Figura 26.	Trazado de rayos.....	40
Figura 27.	Ejemplo archivo MDT.txt.....	42
Figura 28.	Opción Google Earth	43
Figura 29.	Google Earth en la aplicación	43
Figura 30.	Zona de estudio en Google Earth	44
Figura 31.	Ruta Río en GE	45
Figura 32.	Ruta río archivo KML	45
Figura 33.	Cargar archivo de texto del MDT	45
Figura 34.	MDT y Río de la zona de estudio.....	46
Figura 35.	Ver río en MDT.....	46
Figura 36.	Río en el MDT	47
Figura 37.	Ampliación porción del río.....	47
Figura 38.	Inconsistencias en la ruta del río.....	48
Figura 39.	Refinar ruta del río.....	48
Figura 40.	Río refinado	49
Figura 41.	Dibujar río	49
Figura 42.	Dibujar río - Coordenada inicial.....	50
Figura 43.	Río dibujado.....	50

Figura 44.	Funcionalidades sobre el río	51
Figura 45.	Curvas de nivel o isólineas	51
Figura 46.	Vista Uso de suelo.....	52
Figura 47.	Uso de suelo del terreno.....	53
Figura 48.	Vista: Bandas de elevación.....	53
Figura 49.	Mapa de pendientes	54
Figura 50.	Orientación del terreno	55
Figura 51.	Unidades de Respuesta Hidrológica a partir de 3 propiedades.....	56
Figura 52.	Unidades de Respuesta Hidrológica a partir de 2 propiedades.....	57
Figura 53.	Punto inicial para la divisoria de aguas	58
Figura 54.	Divisoria de aguas	58
Figura 55.	Punto clic de divisoria de aguas en GE.....	59
Figura 56.	Zona de estudio para el MDT con 10000 puntos	60
Figura 57.	Ubicación Zona de Estudio a una altura al ojo de 41.84Km	61
Figura 58.	Ampliación de Zona de estudio para validación de resultados	61
Figura 59.	Red Irregular de Triángulos en el software desarrollado	62
Figura 60.	Red Irregular de Triángulos en Topo3	63
Figura 61.	Curvas de nivel a 90 metros en el software desarrollado	63
Figura 62.	Configuración Curvas de Nivel a 90 metros en Topo3	64
Figura 63.	Curvas de nivel a 90 metros en Topo3	64
Figura 64.	Curvas de nivel a 150 metros en el software desarrollado	65
Figura 65.	Configuración Curvas de Nivel a 150 metros en Topo3	65
Figura 66.	Curvas de nivel a 150 metros en Topo3	66
Figura 67.	Curvas de nivel a 180 metros en el software desarrollado	66
Figura 68.	Configuración curvas de nivel a 180 metros en Topo3	67
Figura 69.	Curvas de nivel a 180 metros en Topo3	67
Figura 70.	Bandas de elevación en el software desarrollado	68
Figura 71.	Bandas de Elevación en Topo3	68
Figura 72.	Mapa de pendientes en el software desarrollado	69
Figura 73.	Mapa de pendientes en Topo3	69
Figura 74.	Orientación del terreno en el software desarrollado	70
Figura 75.	Orientación del terreno en Topo3	70
Figura 76.	Red Irregular de Triángulos en el software desarrollado	71
Figura 77.	Red Irregular de Triángulos en Topo3	71
Figura 78.	Curvas de nivel a 25 metros en el software desarrollado	72
Figura 79.	Configuración Curvas de Nivel a 25 metros en Topo3	73
Figura 80.	Curvas de nivel a 25 metros en Topo3	73
Figura 81.	Curvas de nivel a 50 metros en el software desarrollado	74
Figura 82.	Configuración Curvas de Nivel a 50 metros en Topo3	74
Figura 83.	Curvas de nivel a 50 metros en Topo3	75
Figura 84.	Curvas de nivel a 100 metros en el software desarrollado	75
Figura 85.	Configuración curvas de nivel a 100 metros en Topo3	76
Figura 86.	Curvas de nivel a 100 metros en Topo3	76
Figura 87.	Bandas de elevación en el software desarrollado	77
Figura 88.	Bandas de Elevación en Topo3	77
Figura 89.	Mapa de pendientes en el software desarrollado	78

Figura 90.	Mapa de pendientes en Topo3	78
Figura 91.	Orientación del terreno en el software desarrollado	79
Figura 92.	Orientación del terreno en Topo3	79

INTRODUCCIÓN

El comportamiento de las cuencas hidrográficas juega un papel fundamental en el ciclo de vida del ecosistema, dado que impactan de manera directa a los seres vivos (hombres, animales, plantas) y su hábitat a través de lluvias, las cuales afectan negativamente la vida humana cuando se presenta escasez hídrica o fuertes lluvias. Esto se debe en parte a que el comportamiento del agua no es homogéneo, dado que aspectos como suelo, clima, relieve, precipitación, temperatura, radiación, entre otros, varían espacialmente. Estas características o propiedades físicas de forma y relieve dan origen a porciones del territorio de la cuenca con un similar comportamiento hidrológico conocido como Unidades de Respuesta Hidrológica (URH), las cuales permiten el estudio de las cuencas a partir de las condiciones homogéneas relacionadas con la topografía, uso de la tierra y suelo.

El manejo y gestión de las cuencas hidrográficas desempeñan un papel fundamental en la reducción de los riesgos naturales relacionados con el comportamiento del agua, por un lado está la escasez hídrica y por otro lado fuertes lluvias que llegan a ocasionar inundaciones que conllevan pérdidas económicas y/o vidas. Hoy en día existen varias herramientas y medidas relacionadas con la evaluación del riesgo ante amenazas naturales, una de ellas son los modelos hidrológicos cuya unidad de análisis puede ser la celda o la unidad de respuesta hidrológica; sin embargo, algunas de estas herramientas presentan inconvenientes como:

- Al trabajar con celdas, se toma el comportamiento de la celda central con respecto a las circundantes.
- Uno de los errores más destacados en la estimación de la respuesta hidrológica de la cuenca es la entrada de la precipitación. Cuando las estaciones de lluvia son muy pocas o están cercanas a la cuenca no hay medios de calibrar la entrada de lluvia, los errores de estimación de flujo ocurren muy a menudo. (Vieux)
- Algunos de los modelos hidrológicos que se utilizan tiene un propósito de funcionalidad diferente al análisis de representatividad¹ de cuencas hidrográficas.

En este trabajo se busca a través de la construcción de un software, tomar una zona de estudio de una cuenca hidrográfica e involucrar propiedades físicas de forma y relieve para obtener unidades de respuesta hidrológica que permitan un análisis más realista del comportamiento del agua en la cuenca en función de la conducta que ésta tiene frente a propiedades comunes como pendiente, elevación, aspecto, usos de suelo, tipo de suelo, cubierta vegetal; además se busca dividir la cuenca por bandas de igual elevación y a la vez subdividir éstas por orientación y subcuenca.

¹ Análisis de representatividad, en este trabajo se busca a través del modelo digital del terreno poder reflejar o hacer presente el conjunto de propiedades comunes: bandas de elevación, pendiente, orientación del terreno, uso de suelo de la zona de estudio, con el fin de trabajar las unidades de respuesta hidrológicas.

A través de la URH como unidad básica de análisis, se busca integrar información relacionada con propiedades comunes de especial importancia hidrológica como: pendiente, elevación, orientación, usos de suelo, entre otros, con el fin de evaluar el grado de representatividad de una cuenca hidrográfica natural a partir de la simplificación de tareas y la creación automática de las propiedades comunes y el cálculo de las unidades de respuesta hidrográfica con el fin de economizar tiempo y fomentar el estudio y/o análisis de la representatividad de la cuenca, especialmente cuando no se está familiarizado con los cálculos que se deben realizar para construir una representación digital del terreno y las propiedades de forma y relieve involucradas.

Por lo mencionado anteriormente, este proyecto de grado ofrece una alternativa de solución a los problemas mencionados, a través de la ejecución de los siguientes objetivos.

Objetivo General

Diseñar e implementar un software que permita procesar el conjunto de características comunes: pendiente, elevación, usos de suelo y orientación del terreno, que influyen en la respuesta hidrológica de la cuenca, con el fin de analizar y/o evaluar el grado de representatividad de la cuenca mediante unidades de respuesta hidrológica.

Del objetivo general se desglosan los siguientes objetivos específicos:

- ◆ Identificar computacionalmente las unidades de respuesta hidrológica que son homogéneas en términos de su respuesta hidrológica y propiedades comunes como: pendiente, elevación, usos de suelo y orientación del terreno.
- ◆ Definir los requisitos de entrada que debe cumplir la cuenca hidrográfica natural de estudio, para procesar las características comunes en el software desarrollado. En el caso de no existir la información necesaria, establecer una metodología de cómo obtener los datos.
- ◆ Generar el modelo digital del terreno y obtener y/o calcular las propiedades comunes: pendiente, bandas de elevación, usos de suelo y orientación del terreno, asociadas a la cuenca hidrográfica.
- ◆ Diseñar una interfaz gráfica que permita al usuario utilizar y configurar según su necesidad las propiedades físicas comunes (pendiente, elevación, usos de suelo y orientación del terreno) a utilizar en el cálculo de las unidades de respuesta hidrológica de la zona de estudio.

Como aporte del desarrollo de este trabajo podemos destacar que el software construido busca simplificar las tareas relacionadas con el modelamiento del terreno dado que facilita la obtención del modelo digital del terreno a partir de Google Earth como fuente externa, o utilizar uno propio según los requerimientos de entrada establecidos por el software; además permite configurar y crear automáticamente el conjunto de vistas asociadas a las bandas de elevación del terreno, el mapa de pendientes, el mapa de orientación del terreno que junto con los usos de suelos

representan las propiedades comunes a utilizar en el cálculo de las unidades de respuesta hidrográfica y a partir de éstas proporcionar una representatividad de la cuenca de la zona de estudio.

A lo largo del presente documento se abordan los conceptos teóricos y prácticos que se necesitaron para llevar a cabo el proyecto. El documento se encuentra organizado en diez partes como se explica a continuación:

Introducción

Este capítulo da una visión general del trabajo desarrollado, los objetivos que cumple y una ubicación del contexto en general.

Capítulo I: Marco Teórico

Este capítulo contiene las bases teóricas sobre las cuales se encuentra enmarcado el proyecto, ellas contemplan: cuenca, cuenca hidrográfica, cuenca hidrológica, comportamiento hidrológico, unidades de respuesta hidrológica, modelo digital del terreno, triangulación de Delaunay, red irregular de triángulos, entre otros conceptos relacionados con modelación digital e hidrológica de la zona de estudio.

Capítulo II: Modelo Conceptual y Metodológico

En este capítulo se presenta el proceso empleado para llevar a cabo la modelación digital e hidrológica de la cuenca de estudio.

Capítulo III: Análisis y Diseño del software

En este capítulo se describe el desarrollo del software, desde su fase inicial hasta la fase final.

Capítulo IV: Descripción del Software

Este capítulo contiene información relacionada con el uso de la herramienta para el estudio de la cuenca hidrográfica.

Capítulo V: Resultados Obtenidos

Consiste en validar la representación de la cuenca obtenida mediante el software versus otros sistemas geográficos como por ejemplo: Google Earth, Topo3.

Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones

Esta parte describe las conclusiones a las cuales se llegó una vez culminado el desarrollo del proyecto. También contiene las respectivas recomendaciones para futuros trabajos en esta temática.

Glosario

Este capítulo detalla algunas palabras propias de la temática trabajada en el proyecto.

Bibliografía

Este capítulo indica la bibliografía de los documentos utilizados.

Anexos

En este capítulo se presenta a mayor detalle algunos de los temas tratados en el desarrollo del presente trabajo.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan las bases conceptuales más importantes que brindan una idea general del proyecto. Estas bases se dividen en dos grandes grupos: los conceptos relacionados con la cuenca hidrográfica y los conceptos relacionados con el modelamiento digital del terreno.

1.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE UNA CUENCA

1.1.1. Cuenca

Se entiende por cuenca aquella depresión o forma geográfica que hace que el territorio vaya perdiendo altura a medida que se acerca al nivel del mar. Las cuencas hidrográficas son aquellas que hacen que el agua que proviene de las montañas o del deshielo, descienda por la depresión hasta llegar al mar. En algunos casos, la cuenca puede no alcanzar el nivel del mar si se trata de un valle encerrado por montañas, en cuyo caso la formación acuífera será una laguna o lago.²

Otra definición de **Cuenca**, refiere una llanura sedimentaria, depresión o concavidad, accidente geográfico, superficie rodeada de alturas.³

La cuenca constituye la principal unidad territorial donde el agua, proveniente del ciclo hidrológico, es captada, almacenada y disponible como oferta de agua.

Dentro de la definición de cuenca, existen los términos cuenca hidrográfica y cuenca hidrológica.

1.1.1.1. Cuenca Hidrográfica

Una cuenca hidrográfica se refiere exclusivamente a las aguas superficiales; las cuencas hidrográficas son unidades morfográficas superficiales, sus límites quedan establecidos por la divisoria geográfica principal de las aguas de las precipitaciones; también conocido como “parteaguas o divisoria de aguas”.

Una cuenca hidrográfica puede ser dividida en las secciones:

1. **Cuenca alta**, que corresponde con las áreas montañosas limitadas en su parte superior por las líneas divisorias de aguas.
2. **Cuenca media**, que comprende las zonas de pie de monte y valles bajos, donde el río principal mantiene un cauce definido.
3. **Cuenca baja o zonas transicionales** (como los estuarios o humedales), donde el curso de agua divaga o desaparece como tal.

² Definición de Cuenca. Tomado de:

<http://www.definicionabc.com/geografia/cuenca.php#ixzz2hevXLs68>

³ Tomado de <http://es.wikipedia.org/wiki/Cuenca>

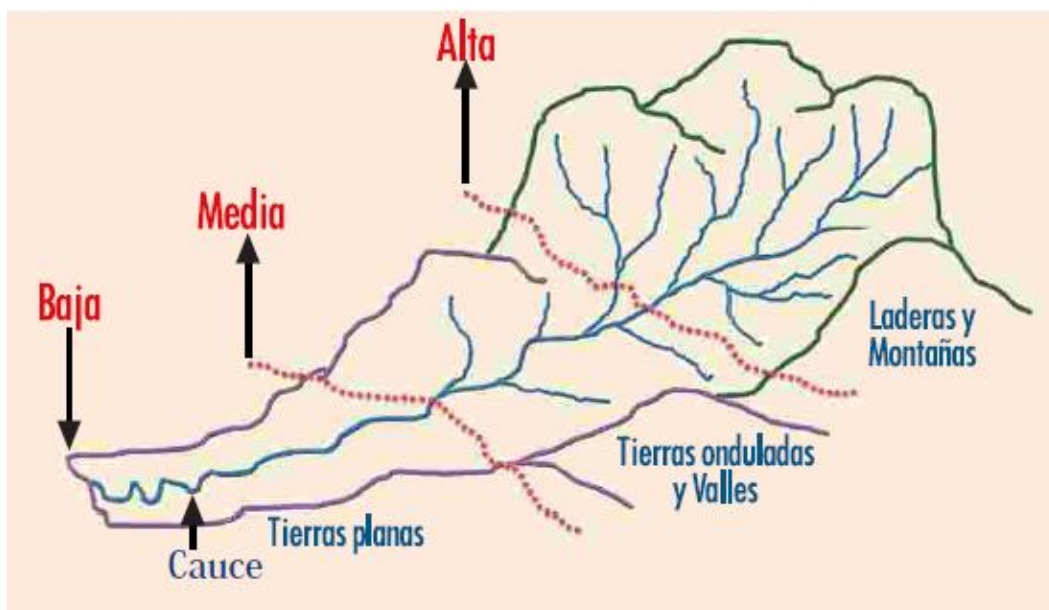


Figura 1. Partes de una cuenca hidrográfica

1.1.1.2. Cuenca Hidrológica

Las cuencas hidrológicas son unidades morfológicas integrales y además de incluir todo el concepto de cuenca hidrográfica, abarcan en su contenido, toda la estructura hidrogeológica subterránea del acuífero como un todo.

Tanto las cuencas hidrográficas como las hidrológicas se pueden subdividir en tres zonas de funcionamiento hídrico principales:

- ✦ **Zona de cabecera de las cuencas hidrográficas:** garantizan la captación inicial de las aguas y el suministro de las mismas a las zonas inferiores durante todo el año.
- ✦ **Zonas de cabecera y captación:** transporte en condiciones de cuencas semiáridas.
- ✦ **Zonas de emisión de los acuíferos:** las lagunas costeras regulan el funcionamiento de los ecosistemas marinos adyacentes.

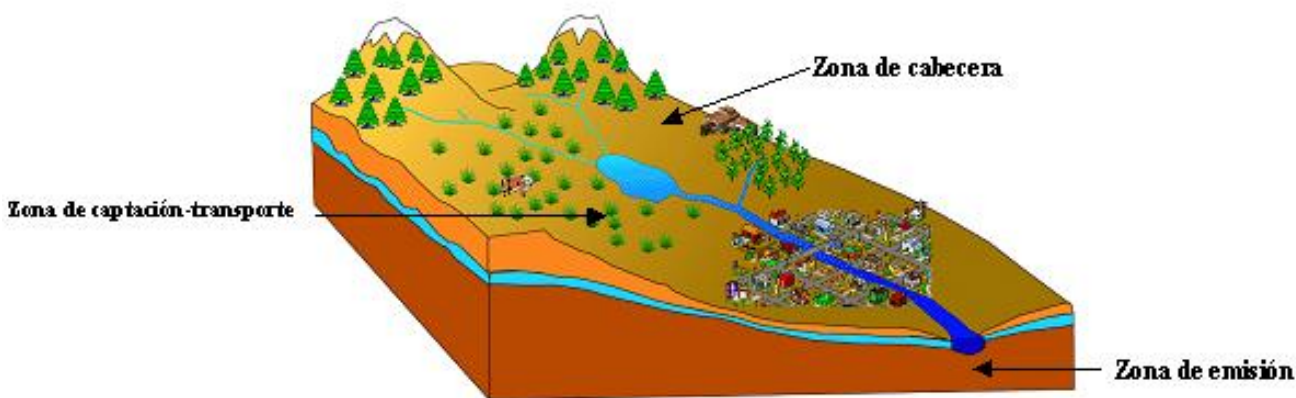


Figura 2. Zonas de funcionamiento hídrico de una cuenca

1.1.2. Divisoria de aguas

Se llaman divisorias de aguas o divisorias de vertientes, a las líneas de separación que se pueden trazar entre cuencas hidrográficas o vertientes adyacentes y suelen coincidir con crestas montañosas, en las que cada lado conduce sus aguas hacia cauces, cuencas o mares distintos.

La divisoria de aguas o parteaguas, teóricamente, es una línea imaginaria que une los puntos de máximo valor de altura relativa entre dos laderas adyacentes pero de exposición opuesta; desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de emisión, en la zona hipsométricamente más baja. Las divisorias que delimitan las subcuencas se conocen como parteaguas secundarios.

1.1.3. Comportamiento Hidrológico

El correcto conocimiento del comportamiento hidrológico de un río, arroyo o de un lago es fundamental para poder establecer las áreas vulnerables a los eventos hidrometeorológicos extremos, dado que el conocer el comportamiento hidrológico permite explicar las propiedades y las formas de manifestación de las aguas, describiendo la circulación de los recursos hídricos y su balance.

El territorio de una cuenca no presenta un comportamiento hidrológico homogéneo, dado que aspectos como suelo, clima, relieve, precipitación, temperatura, radiación, entre otros, varían espacialmente.

1.1.4. Unidades de Respuesta Hidrológica

Una unidad de respuesta hidrológica (URH) es un área considerada homogénea para propósitos de modelamiento. Se supone que las áreas dentro de cierta unidad muestran relaciones similares entre los ingresos y salidas de un modelo, por ejemplo: entre precipitación y escorrentía, y que se pueden modelar con los mismos parámetros. Así, a una cuenca se considera como una colección de unidades de respuesta hidrológica que en este caso difieren en su relación precipitación – escorrentía (Irvine, 2002).

Las unidades de respuestas hidrológicas dentro del estudio de las cuencas, corresponden a unidades del territorio que presentan condiciones homogéneas de uso de tierra, suelo y topografía, que generan un impacto particular sobre la cantidad y la calidad del agua de la cuenca.

Las URHs son áreas de una cuenca que son homogéneas en términos de su respuesta hidrológica y características geo-climáticas, esta “homogeneidad” no es sinónimo de subcuenca; por el contrario, una URH está conformada usualmente por áreas dispersas, desconectadas entre sí, pero que mantienen propiedades comunes de especial importancia hidrológica, como son: pendiente (que determina la velocidad de la escorrentía superficial), elevación (el volumen de precipitación varía con la altura), aspecto (especialmente en cuencas con nieve), tipo de suelo, cubierta vegetal, usos de suelo, etc.

Para definir un grupo de URHs es recomendable elegir una categoría o propiedad para subdividir el área total de la cuenca; luego, se elige una segunda categoría para obtener mayor detalle, y así sucesivamente. Estas categorías deben elegirse tomando en cuenta su importancia en el proceso de formación de la escorrentía superficial dentro de la cuenca. No todas las propiedades mencionadas se utilizan en la definición de las URHs, depende del criterio del modelador definir cuáles son las “propiedades dominantes” que se utilizarán en la definición.

Dentro de los programas computacionales que incorporan el concepto de las URHs, se encuentran:

♦ ***El modelo de simulación hidrológica SWAT*** (Soil and Water Assessment Tool) (Morales Arroyo, 2010), generado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, permite cuantificar la producción de agua, sedimentos y el efecto de las prácticas agronómicas en la calidad del recurso agua por el uso de plaguicidas, pesticidas y fertilizantes.

Los componentes principales de SWAT incluyen: (a) el clima, (b) la escorrentía superficial, (c) los flujos de retorno, (d) la infiltración, (e) la evapotranspiración, (f) las pérdidas por transmisión, (g) el almacenamiento en reservorios, (h) el crecimiento de los cultivos, (i) la irrigación, (j) el flujo de aguas subterráneas, (k) el direccionamiento de las corrientes, (l) la recarga de nutrientes y pesticidas y (m) la transferencia de agua.

SWAT divide la cuenca en subcuencas. Cada subcuenca se divide, a su vez, en una serie de Unidades de Respuesta Hidrológica (URH). Cada URH es una combinación única de un tipo específico de suelo y uso de la tierra (tipo de vegetación, tipo de zona urbana, entre otros). SWAT simula la hidrología, el crecimiento de vegetación y las prácticas de manejo a nivel de cada URH, como también para cada subcuenca. En SWAT, es posible determinar el número de URH requeridos en cada subcuenca con base a valores límite, los cuales representan el porcentaje del área de cobertura de uso o suelo sobre una subcuenca, que puede ser obviada. Valores límites mínimos resultarán en un mayor detalle, por ende mayor número de URH.

La figura 3 presenta un esquema general del funcionamiento del modelo SWAT

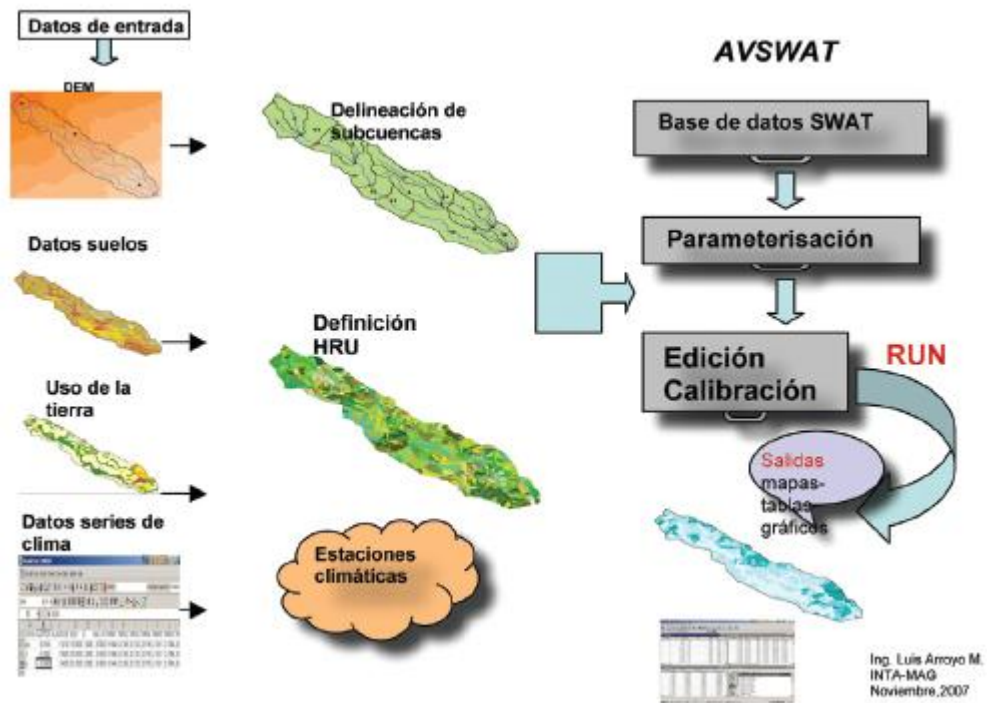


Figura 3. Esquema del modelo SWAT

♦ **Raster Calculator de Arc GIS**

La definición de URHs se puede realizar de manera rápida utilizando la herramienta Raster Calculator de Arc GIS. Para este fin, la información mínima requerida es el DEM y el mapa de usos de suelo (landuse) o de cubierta de suelo (landcover).

La herramienta Calculadora Ráster de Arc Gis permite crear y ejecutar expresiones de álgebra de mapas. Para utilizar esta potente función en ArcGis, se dirige a la opción Raster Calculator del menú Spatial Analyst, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 4. Opción Calculadora Ráster en Arc Gis

Luego de dar clic sobre la opción Raster Calculator aparece la siguiente ventana.



Figura 5. Calculadora Ráster en Arc Gis

En la ventana anterior se muestran tres secciones que se describen a continuación:

El listado de capas (Layer), permite seleccionar los ráster con los cuales se trabajará y a los que se les aplicarán los operadores y funciones.

El Teclado numérico y operadores, permite establecer las operaciones que se aplicaran a los ráster.

El cuadro de expresiones, es donde se digitan las operaciones que se realizarán a las capas o ráster. Se puede construir una expresión, ya sea digitándola directamente en el cuadro de expresiones o marcando las capas con el cursor y señalando las operaciones a realizar con los botones del teclado numérico.

A continuación a manera de ejemplo se va a describir la sintaxis para la pendiente del terreno mediante la calculadora ráster y el Modelo Digital de Elevación denominado **MDE_Apartado**.

Slope

Sintaxis: Slope(<grid>, <z_factor>, {DEGREE | PERCENTRISE})

Donde:

Slope	Función a aplicar.
<Grid>	Raster al cual se le sacará la pendiente
<z_factor>	Factor de exageración. El valor por defecto es 1.
{DEGREE PERCENTRISE}	Palabras clave especificando las unidades en que será expresado el valor de la pendiente. DEGREE - La pendiente se medirá en Grados. PERCENTRISE - La pendiente se medirá en porcentaje.

Tabla 1. Sintaxis pendiente mediante la calculadora ráster

De acuerdo a la sintaxis descrita, en la calculadora ráster se escribe la expresión:
 $Pendiente = Slope([MDE_Apartado], 1, PERCENTRISE)$.

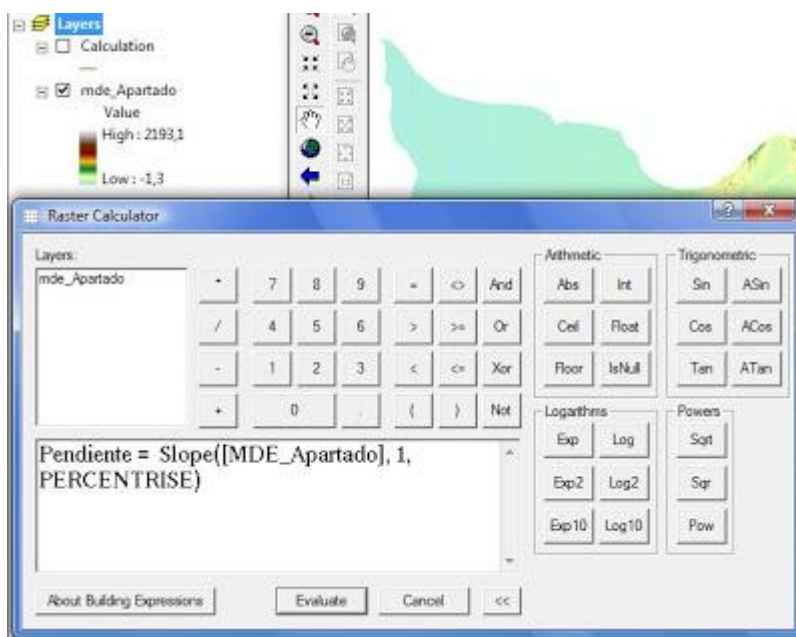


Figura 6. Sintaxis para calcular la pendiente en la Calculadora Ráster

El resultado es el siguiente.

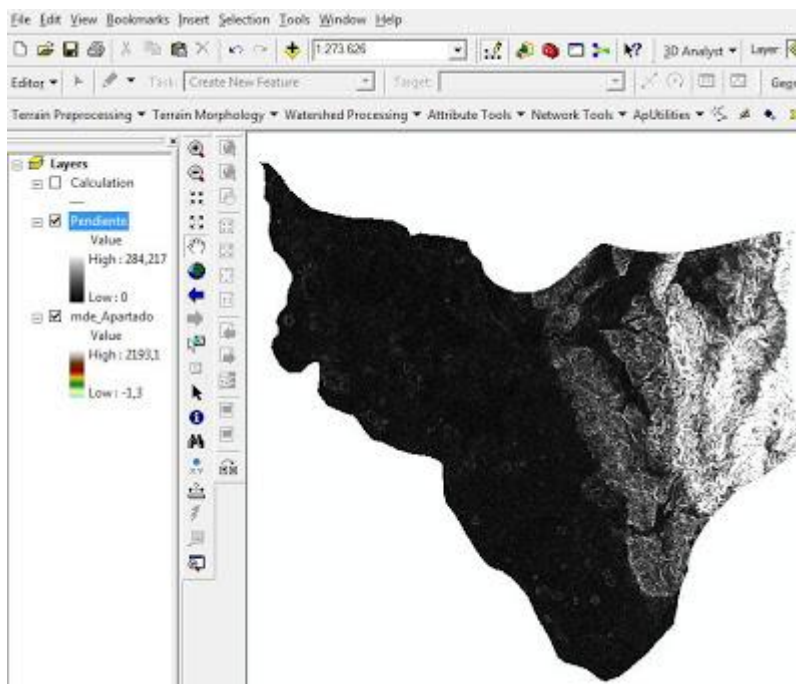


Figura 7. Pendiente calculada mediante la Calculadora Ráster

Para cambiar el formato, dar clic derecho sobre el ráster **Pendiente** (creado al aplicar la función), elegir **propiedades** y en la pestaña **Simbology** señalar **Classified**, en

Classes señalar 9 o los rangos de color que se desee y en **Color Ramp** seleccionar la composición de color deseada. El resultado es el siguiente:

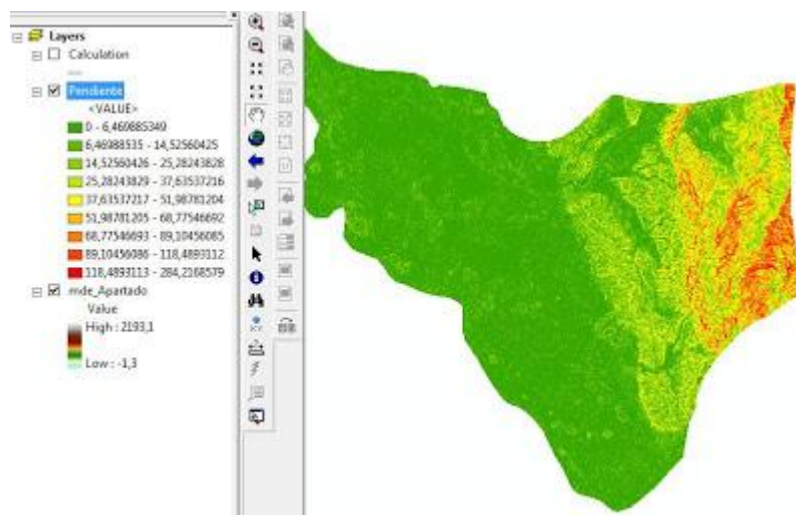


Figura 8. Pendiente en rango de colores

En la calculadora ráster se pueden trabajar las operaciones: contour, slope, aspect, Hillshade y viewshed entre otras.

1.2. MODELAMIENTO DIGITAL DEL TERRENO

Para modelar completamente una superficie de terreno se requiere de un número infinito de puntos, lo cual requiere una capacidad infinita de almacenamiento de datos, una tarea imposible para cualquier sistema digital; sin embargo, se han creado diferentes técnicas de generación de modelos digitales que permiten representar superficies continuas en una forma digital con una cantidad finita de puntos.

1.2.1. Modelo Digital de Terreno

El concepto de creación del modelo digital de un terreno es relativamente reciente y la introducción del término modelo digital de un terreno (MDT) es generalmente atribuido a dos ingenieros americanos: Miller y La Flamme (Miller, 1958) del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) durante los años 50. La definición dada por ellos fue la siguiente: “*el MDT es simplemente una representación estática de la superficie de la tierra dada por un gran número de puntos seleccionados con coordenadas conocidas X, Y y Z en un arbitrario sistema de coordenadas*”.

El MDT encierra características de un sistema de información geográfico tales como datos planimétricos, altimétricos, datos de relieve; pendiente, aspecto, visibilidad, drenaje, cuencas hidrográficas, etc.

A continuación se definen algunos términos asociados a los modelos digitales de elevación: (Burrough, 1986) (Petri, 1990)

Modelo digital de elevación (MDE ó MED)

En este caso la palabra elevación enfatiza el concepto de medición de altura con respecto a un datum y la generación por parte del modelo de valores absolutos de altura. Este término se utiliza con frecuencia en los Estados Unidos para describir un arreglo rectangular o hexagonal de puntos con valores de elevación obtenidos por métodos fotogramétricos o cartográficos.

Modelo digital de altura (MDA)

Este término aparentemente se originó en Alemania y su significado es similar al anterior; ya que las palabras altura y elevación pueden utilizarse como sinónimos.

Modelo digital de la tierra (MDT)

En este caso se enfatiza el hecho de que la superficie terrestre es un continuo y que por lo tanto se pueden utilizar métodos de interpolación para obtener estimaciones de “Z” para aquellos sitios para los cuales no se posea información. El término se utiliza en Inglaterra; sin embargo con el tiempo se ha ido reemplazando por “Modelo Digital del Terreno”.

Modelo digital del terreno

Este concepto es un tanto más generalista; ya que el eje Z incluye tanto el uso de elevaciones (Ej. metros sobre el nivel del mar) como de alturas (Ej. levantamiento topográfico); así como los accidentes típicos del paisaje (Ej. ríos, riscos, cañadas, etc.). Para muchos usuarios el término incluye tanto los elementos planimétricos como hipsométricos propios del paisaje; así como la información derivada a partir del modelo (Ej: pendiente, orientación, entre otros).

1.2.1.1. Características de los modelos digitales de terreno (Felicísimo 1994):

- ♦ Los datos están codificados en cifras, lo que permite su tratamiento por medios informáticos.
- ♦ Los datos están estructurados (una simple lista de alturas no es un MDT). Existe una relación entre la posición geográfica y el valor de la altura.
- ♦ Los datos tienen una distribución continua. (De aquí se excluyen las variables discretas representables por polígonos, líneas o puntos).

1.2.1.2. Arquitectura de un modelo digital de terreno

La arquitectura fundamental de un MDT se deriva del modelo de datos usado para representarlo. Los MDTs pueden ser representados mediante una imagen o matemáticamente. Una variedad de estructura de datos ha sido ensayada para almacenar y desplegar la superficie topográfica, sin embargo dos en particular han sido las más populares y las más empleadas: ***la Red Irregular de Triángulos (TIN, por sus siglas en inglés)*** y ***la Malla Rectangular (Rectangular Grid)***.

Los Grid, son mallas rectangulares espaciadas de manera regular, sus datos se almacenan en una matriz que registra las relaciones entre los puntos implícitamente, siendo la estructura de los datos similar a la estructura de almacenamiento de los computadores, el manejo de la matriz de elevación es simple y los algoritmos de modelación de terreno basados en Grid, tienden a ser relativamente sencillos. Por otro

lado la densidad de punto de Grid regular no puede ser adaptada a la complejidad del relieve, así que es requerido un excesivo número de puntos para representar el terreno con un alto nivel de precisión.

La Red Irregular de Triángulos, son triángulos irregularmente distribuidos que representan el terreno, requiriendo más puntos en áreas de terreno montañoso y menor número en áreas de terrenos más suaves, una muestra espaciada irregularmente es por lo tanto más eficiente para representar una superficie, que una muestra de espaciamiento regular tal como una Grid.

1.2.2. Red Irregular de Triángulos

Las redes irregulares de triángulos (*Triangulated Irregular Network* – TIN, por sus siglas en inglés) consisten en un conjunto de triángulos irregulares adyacentes y sin solape. Los triángulos se construyen a partir de los puntos de muestreo con coordenadas x,y,z conocidas, de modo que dichos puntos constituyen los vértices de los triángulos. A cada triángulo se puede asociar un valor de pendientes y de orientación, que es el ángulo que define la dirección del plano del triángulo. Visto en 3 dimensiones, cada triángulo viene a representar una cara de una porción de la superficie terrestre.

1.2.2.1. Definición de una Red Irregular de Triángulos

Triangulated: modela una superficie a partir de puntos de los cuales se forman triángulos. Los triángulos permiten una buena representación de una parte local de la superficie, ya que tres puntos con valores Z definen en forma única un plano en el espacio 3D.

Irregular: los triángulos son formados por tres puntos ubicados en forma irregular. Esta es una ventaja de los TIN, ya que permite tomar puntos de medida con densidad variable, para modelar áreas donde se producen cambios abruptos en el terreno.

Network: cada triángulo almacena la información topológica sobre sus triángulos vecinos, formando una red. Esta estructura permite sofisticados análisis de superficie, así como también una representación compacta de la superficie.

1.2.2.2. Creación de una Red Irregular de Triángulos

- ♦ A partir de un conjunto de puntos, con datos de elevación, colectados de muchas fuentes.
- ♦ A partir de compilaciones realizadas con instrumentos fotogramétricos que permiten obtener la elevación a partir de pares estereoscópicos de fotografías aéreas.
- ♦ A partir de datos medidos en el terreno, curvas de nivel digitalizadas, rásters con valores Z , puntos almacenados en archivos o base de datos, u operaciones con otros TINs. Sobre estos puntos se realiza una triangulación.

En una TIN, los triángulos son llamados caras, los puntos son llamados nodos, y las líneas son llamadas lados.

Una característica de la TIN es que el tamaño de los triángulos se puede ajustar a la complejidad del terreno, de modo que los triángulos serán más pequeños en zonas con

mayor variación de relieve y más grandes en zonas con menor variación. Esto hace que el número de datos que se deben almacenar sea más reducido.

Se pueden aplicar muchos algoritmos para lograr la triangulación a partir de puntos, el más usado es el Algoritmo Delaunay.

1.2.3. Triangulación de Delaunay

La Triangulación de Delaunay de una nube de puntos, denominada así por el matemático ruso Boris Nikolaevich Delone, (1890 - 1980), «Delaunay» forma francesa de su apellido, quien lo inventó en 1934, es la triangulación en la que los puntos más próximos entre sí están conectados por una arista o dicho de otra forma en la que los triángulos resultantes son lo más regulares posibles.

Una triangulación es una subdivisión de un área en triángulos. Una triangulación de una nube de puntos del plano es una familia maximal de triángulos de interiores disjuntos cuyos vértices son puntos de la nube y en cuyo interior no hay ningún punto de la nube. Puede obtenerse una triangulación añadiendo, mientras sea posible, segmentos rectilíneos que unan puntos de la nube que no atraviesen a los segmentos considerados anteriormente.

La idea básica en el algoritmo de triangulación de Delaunay, es:

- ◆ Crear triángulos que colectivamente son lo más parecido a equiláteros.
- ◆ Mantener la interpolación de la elevación en nuevos puntos lo más cercano a los puntos conocidos.
- ◆ Trabajar a partir de puntos, líneas y polígonos o áreas:
 1. Triangulación a partir de los puntos.
 2. Líneas se interceptan con la triangulación anterior y se crean nuevos nodos cuando estas líneas corten a las caras.
 3. Se interceptan las áreas, lo cual puede cortar caras o recortarlas.

Al final del algoritmo:

- ◆ Se almacenan los nodos para cada cara, y para cada cara las caras vecinas (topología).
- ◆ Similar a la topología planar con la diferencia de que los nodos tienen elevación y los polígonos deben ser triángulos.

1.2.3.1. Propiedades Triangulación de Delaunay

A continuación se detallan algunas de las propiedades que cumple la triangulación de Delaunay:

- ◆ Genera una solución única para un conjunto de puntos dado salvo en algunos casos especiales, por ejemplo cuando cuatro puntos pertenecen a una misma circunferencia, donde pueden existir triangulaciones alternativas válidas. Se dice entonces que la triangulación de Delaunay es degenerada.
- ◆ La triangulación forma el cierre convexo del conjunto de puntos.

- ◆ Tres puntos pertenecientes al conjunto de puntos son vértices de la misma cara de la Triangulación de Delaunay sí y solamente si el círculo que pasa por los tres puntos no contiene otros puntos del conjunto.
- ◆ Dos puntos pertenecientes a un conjunto de puntos forman un lado de la Triangulación de Delaunay sí y solamente si existe un círculo que contiene a ambos puntos en su circunferencia y no contiene en su interior ningún otro punto del conjunto.
- ◆ Dados cuatro puntos y el cuadrilátero definido por ellos, la diagonal que los divide en dos triángulos es aquella que hace máximo el menor de los ángulos internos, es decir, la Triangulación de Delaunay tiende a crear triángulos lo más equiláteros posibles.
- ◆ Se llama arista no válida o ilegal, a toda arista de una triangulación que pertenece a dos triángulos tales que forman un cuadrilátero convexo y tal que si se intercambia dicha arista por la otra diagonal del cuadrilátero mejora el vector de ángulos. Las aristas no válidas son aquellas para las que es posible hacer un flip.
- ◆ Generalizando se puede afirmar que una triangulación de un conjunto de puntos en el plano es una Triangulación de Delaunay, sí y solamente si, todas las aristas son legales.

Caracterización de la triangulación de Delaunay

Sea $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, un conjunto de puntos en el plano, una triangulación de Delaunay de P cumplirá las siguientes propiedades:

Propiedad 1:

Tres puntos p_i , p_j y p_k pertenecientes a P son vértices de la misma cara de la Triangulación de Delaunay de P , si y solamente si, el círculo que pasa por los puntos p_i , p_j y p_k no contiene puntos de P en su interior.

La triangulación de Delaunay tiene la propiedad de que la circunferencia circunscrita a cada triángulo no contiene a ningún otro punto de la triangulación.

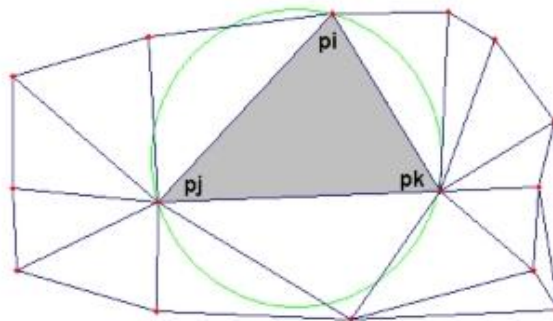


Figura 9. Propiedad 1 - Triangulación de Delaunay.

Propiedad 2:

Dos puntos p_i y p_j pertenecientes a P forman un lado (arista) de la Triangulación de Delaunay de P , si y solamente si, existe un círculo que contiene a p_i y p_j en su circunferencia y no contiene en su interior ningún punto de P .

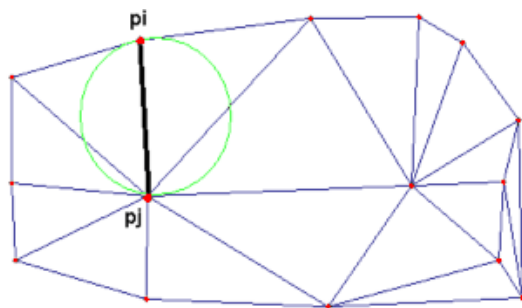


Figura 10. Propiedad 2 - Triangulación de Delaunay

Con estas dos propiedades se puede caracterizar la triangulación de Delaunay de la siguiente manera:

Sea P un conjunto de puntos en el plano y T una triangulación de P , T es una triangulación de Delaunay de P , si y solamente si, la circunferencia circunscrita de cualquier triángulo de T no contiene puntos de P .

1.2.4. Curvas de Nivel

Cada curva de nivel es una línea continua, la cual forma una figura cerrada, ya sea dentro o más allá de los límites del mapa o del dibujo (cuando estas líneas cruzan una característica vertical hecha por el hombre, tal como una pared o gradas, esa curva de nivel se superpondrá con esa característica en el plano).

Todos los puntos de la curva de nivel están a la misma elevación y todas las curvas de nivel están separadas en un mapa por el intervalo de la curva, el cual es la diferencia en elevación entre las curvas.

Se requiere de dos o más curvas de nivel para indicar una forma tridimensional y la dirección de una pendiente. La dirección de la pendiente es siempre perpendicular a las curvas de nivel y por lo tanto, cambia de acuerdo al cambio de dirección de las curvas. El agua fluye de manera perpendicular a las curvas de nivel en dirección de bajada.

Generalmente, para la misma escala e intervalo de nivel, el ángulo de la inclinación se incrementa a medida que la distancia entre las curvas de nivel disminuye. Las curvas de nivel igualmente espaciadas indican una inclinación que se mantiene constante. Las curvas de nivel nunca se cruzan excepto cuando existe un precipicio saliente, un puente natural o alguna forma de tierra similar. Finalmente, en el paisaje natural, las curvas de nivel nunca se dividen o se parten (este no es siempre el caso donde el paisaje natural y el hecho por el hombre se encuentran).

1.2.5. Pendiente

Por definición, *Pendiente* hace referencia a un plano inclinado, al declive del terreno en relación al plano horizontal.

Otras definiciones de pendiente son:

- ◆ Todo plano desviado de la horizontal del suelo recibe el nombre general de pendiente.
- ◆ Grado de inclinación de un terreno, medido por el ángulo que forma con respecto a la horizontal.
- ◆ Índice del cambio en la elevación sobre el plano; normalmente expresada en porcentaje.

Para una TIN, la pendiente es el máximo índice de cambio en la elevación a través de cada triángulo. La pendiente es la inclinación de una superficie; menos pendiente significa un terreno más plano, más pendiente significa un terreno más empinado. Por ejemplo, se puede utilizar la pendiente para determinar zonas de poca inclinación favorables para la construcción, o zonas de mucha pendiente que determinan mucha erosión o deslizamientos de tierra.

1.2.6. Usos de suelo

El uso del suelo es el uso que los seres humanos hacen de la tierra. El uso del suelo abarca la gestión y modificación del medio ambiente natural para convertirlo en un ambiente construido tal como campos de sembradío, pasturas y asentamientos humanos. También ha sido definido como "las acciones, actividades e intervenciones que las personas realizan sobre un determinado tipo de superficie para producir, modificarla o mantenerla" (FAO, 1997a; FAO/UNEP 1999⁴). El término **uso del suelo** a menudo es utilizado para referirse a los distintos usos de la tierra en zonificaciones.

1.2.7. Orientación de terreno

La orientación y posición del terreno son elementos fundamentales para la localización exacta de las diferentes zonas geográficas. La orientación del terreno se apoya en los cuatro puntos cardinales, cuyas referencias básicas son el plano del horizonte y el movimiento aparente del Sol (el movimiento real es el de la propia rotación de la Tierra). Así, para orientarse en este plano se tomaba como partida el punto de salida del Sol, es decir el Este u *Oriente*, de ahí el término "orientarse"; el punto contrario al Oriente es el Oeste u Occidente, por donde se pone el sol, también llamado *ocaso*.

La orientación del terreno es el ángulo medido en la dirección horaria desde el norte (acimut) donde se produce la máxima pendiente;

Las superficies llanas, con valor de orientación 0, se clasifican normalmente dentro de la clase sur. También es conveniente considerar los mapas de pendientes como criterio a considerar en la reclasificación de los valores de orientación a clases de exposición. Por ejemplo, (Klingebiel, 1987) determinaron que el terreno debe tener una pendiente mayor a 15° para que la orientación fuese un factor que influya en la formación del suelo.

La orientación se puede utilizar para determinar cuánto sol va a recibir una pendiente, por ejemplo; para modelar cuánto va a crecer la vegetación, cuánta nieve se va a derretir, o cuánto calor va a recibir un edificio.

⁴ [IPCC Special Report on Land Use, Land-Use Change And Forestry, 2.2.1.1 Land Use](#)

CAPÍTULO 2

MODELO CONCEPTUAL Y METODOLÓGICO

En este capítulo se describe cuál es el papel y cómo se involucran en el desarrollo del proyecto los conceptos definidos en el marco teórico; una vez descritos los conceptos fundamentales del análisis, diseño, aplicar dichos conceptos en la construcción del desarrollo del software.

2.1. MODELO CONCEPTUAL

Presenta los conceptos y relaciones a alto nivel, abstraídos del modelado de cuencas hidrográficas mediante unidades de respuestas hidrológicas, éstos se indican a continuación:

- ♦ **Zona de estudio:** hace referencia a la zona geográfica y/o territorial de la cuenca hidrológica que se quiere estudiar. La zona de estudio es representada a través de visores de cartografía como Google Earth.
- ♦ **Archivo MDT:** el archivo contiene la información de las coordenadas x,y,z (Norte, Este, Cota, en coordenadas UTM) de la zona de estudio. Estas coordenadas constituyen los datos para el modelo digital del terreno de la zona de estudio y del río.
- ♦ **Red Irregular de Triángulos y Triangulación de Delaunay:** a partir de las coordenadas x,y,z del archivo MDT, se crea una red irregular de triángulos (TIN) que cumpla la condición de Delaunay. Además, a partir de la TIN se construyen representaciones gráficas del terreno de la zona de estudio y del río, entre éstos visores tenemos: las curvas de nivel o isolíneas, las unidades de respuesta hidrológica, mapa de pendientes, mapa de orientación, bandas de elevación, orientación del terreno.
- ♦ **Curvas de nivel:** permite generar contornos con una equidistancia de 100 metros por defecto, este valor puede ser modificado a necesidad.
- ♦ **Mapa de Pendientes:** a partir de los valores almacenados en el DEM también es posible generar un mapa de pendientes, con base a grados: de 0° a 90° o con base a porcentaje (una pendiente de 45° es del 100%). Generalmente se simbolizan en tonos rojos las zonas de mayor pendiente y en verdes las zonas más planas.
- ♦ **Mapa de Orientación de Laderas (exposición al Sol):** otra vista muy interesante es la de Orientación de laderas con respecto al norte geográfico, en general se utiliza la simbología de la rosa de los vientos, dividiendo los 360° en 8 sectores de 45°.

Otros conceptos involucrados en el modelado:

- ◆ **Breaklines o líneas de quiebre:** representan elementos naturales tales como cursos, cantos, o elementos hechos por el hombre tales como carreteras. Agregan bordes y nodos al TIN.

Existen dos tipos de breaklines: Hard y Soft

Hard Breaklines

- ◆ Representan una discontinuidad en la pendiente tales como cursos de agua. La superficie es siempre continua pero la pendiente no.
- ◆ Permiten preservar la forma de la superficie y mejorar el análisis y la visualización en la TIN.
- ◆ Permiten capturar los cambios bruscos en la superficie.

Soft Breaklines

- ◆ Permiten agregar bordes o lados para representar elementos lineales, pero no representan discontinuidad en la pendiente, no van a influenciar la forma del TIN.

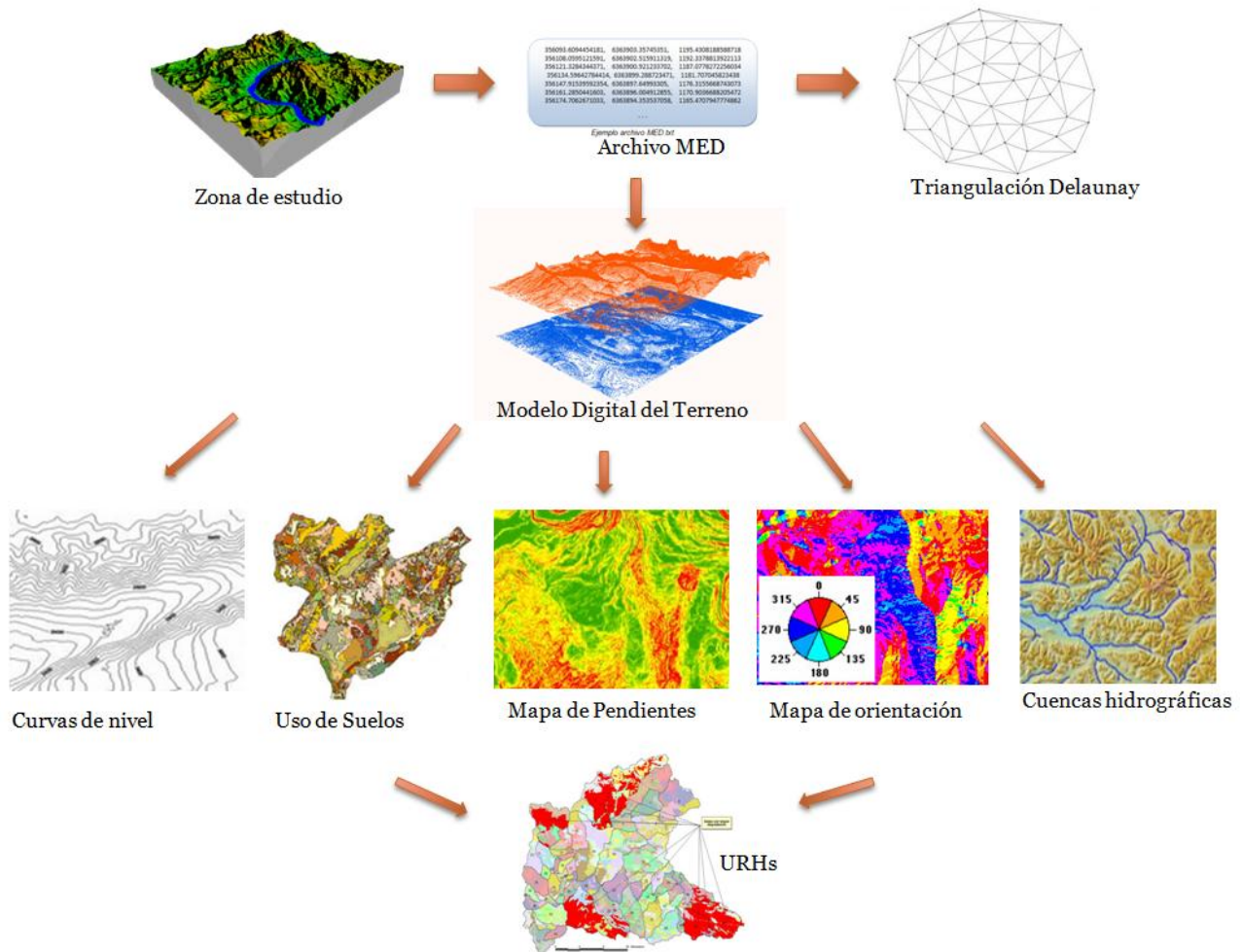


Figura 11. Algunos conceptos del modelado de cuencas hidrográficas

2.2. MODELO METODOLÓGICO

Para trabajar la información de la cuenca hidrográfica de la zona de estudio, se realizó el siguiente proceso a nivel macro:

1. **Identificar la zona de estudio:** se definió como área de estudio la cuenca del río Aconcagua en Chacabuquito, localizada en la zona central de Chile al este de la ciudad de Los Andes, Región de Valparaíso, Chile, entre los paralelos 32,43° y 33,18° de latitud sur, y entre los meridianos 69,98° y 70,53° de longitud oeste.

2. **Identificar la zona del río,** que hará parte de la cuenca hidrográfica del caso de estudio, es importante ubicar lo más exacto posible la zona de estudio, dado que de aquí se va a obtener información que hará parte del modelo digital del terreno.

Si se cuenta con la información del modelo digital del terreno, es decir, la coordenadas x,y,z, es necesario que esta información posea el mayor número de coordenadas con el fin de obtener una representación más exacta de la zona de estudio. Si no se cuenta con información de las coordenadas asociadas al río y/o de la zona de estudio, se cuenta con las siguientes opciones:

- ◆ Crear la ruta del río a partir de un programa de sistemas de información geográfica y obtener mediante éste, las coordenadas x,y,z asociadas a la ruta del río. Aquí se debe tener en cuenta que del número de coordenadas obtenidas va a depender la calidad de la ruta del río construida.
- ◆ Identificar la zona de estudio y trazar en el programa de SIG el terreno que contiene el río, para obtener las coordenadas x,y,z asociadas.
Es necesario que las coordenadas obtenidas tanto del río como de la zona de estudio, estén en coordenadas UTM, separadas por comas y contenidas en un archivo de texto (.txt)
De ser posible, se debe refinar o mejorar la información de las coordenadas, para permitir representar mejor ciertos detalles del terreno, especialmente en el caso de cursos de agua, lagos, por ejemplo.

3. **Construir el modelo digital del terreno:** con base en la información de las coordenadas del terreno y del río, se trabaja una red irregular de triángulos (TIN) que cumpla con las condiciones de la triangulación de Delaunay.

4. **Análisis y construcción de información de la zona de estudio:** A partir de la TIN se realizan cálculos que permiten obtener información asociada a las características comunes de la zona de estudio, como lo son: bandas de elevación, curvas de nivel, mapa de pendientes y mapa de orientación del terreno, también se adiciona información asociada con el uso del suelo de la zona de estudio; con base en estas características se calcula las unidades de respuesta hidrológica (URH) de la zona de estudio.

2.2.1. Metodología de trabajo

A continuación se detallan los pasos principales involucrados dentro de la metodología de trabajo diseñada para el análisis de representatividad de cuencas hidrográficas mediante URHs.

2.2.1.1. Creación de una Red Irregular de Triángulos

A partir de la nube de puntos del terreno, se aplica el algoritmo de Delaunay de triangulación, la idea básica es:

1. Triangulación a partir de los puntos.
2. Líneas se interceptan con la triangulación anterior y se crean nuevos nodos cuando estas líneas corten a las caras.
3. Se interceptan las áreas, lo cual puede cortar caras o recortarlas.

Al final del algoritmo:

- Se almacenan los nodos para cada cara, y para cada cara las caras vecinas (topología).
- Similar a la topología planar con la diferencia de que los nodos tienen elevación y los polígonos deben ser triángulos.

Creación de un TIN



- Cada cara de un TIN es parte de un plano en 3D.
- Todas las caras vecinas comparten con precisión nodos y lados, no se interceptan.

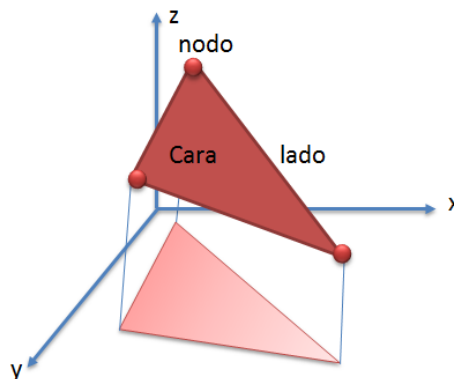


Figura 12. Creación de una TIN

Al utilizar el algoritmo de Delaunay, la red irregular de triángulos debe cumplir la condición de Delaunay.

Triangulación de Delaunay

Optimiza la representación de la superficie

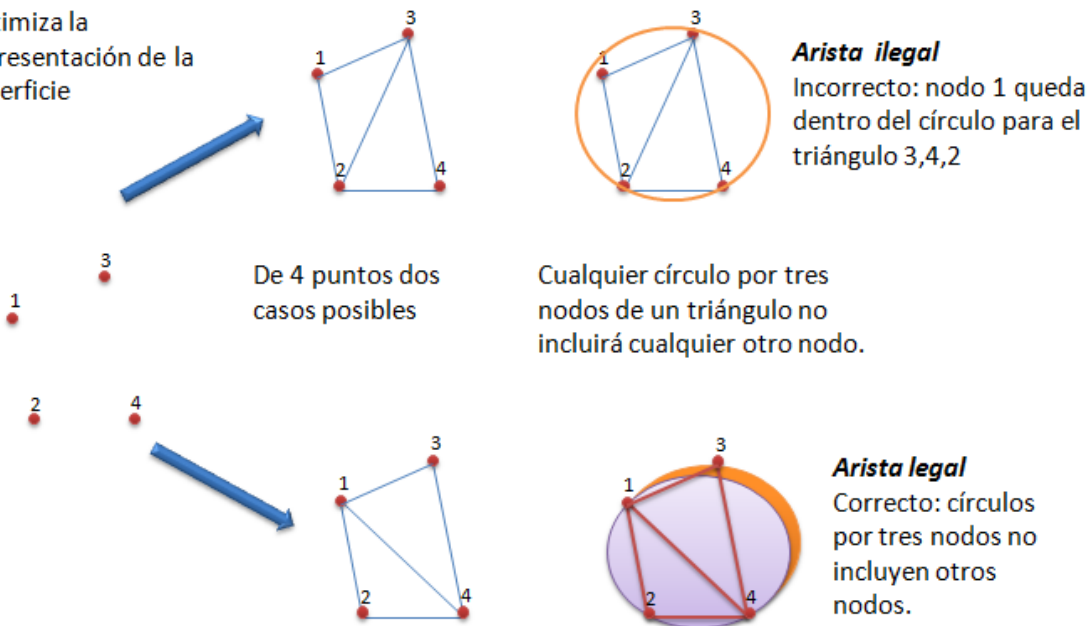


Figura 13. Triangulación de Delaunay en la creación de la TIN

Si al utilizar la triangulación de Delaunay, se presenta una arista no válida o ilegal, es decir, una arista de una triangulación que pertenece a dos triángulos tales que forman un cuadrilátero, se realizan las siguientes operaciones a cada triángulo:

1. **Test del círculo:** Para el triángulo t , esta operación verifica que el circuncírculo de t no contenga un vértice de otro triángulo en su interior, es decir, el test valida que t cumpla la condición de Delaunay.
2. **Intercambio de diagonales** (para Delaunizar pares de triángulos): Si el test del círculo falla, entonces el circuncírculo de t contiene un vértice de algún triángulo adyacente t_2 , por lo tanto, la arista que comparten t y t_2 es ilegal y debe ser reemplazada por la otra diagonal del cuadrilátero formado por ambos triángulos.

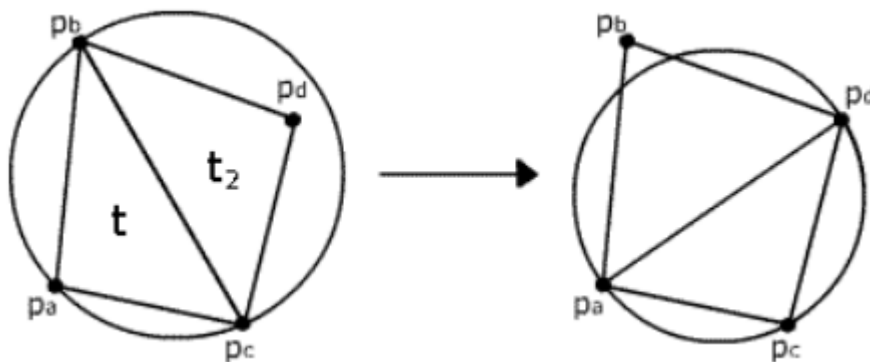


Figura 14. Intercambio de diagonales

2.2.1.2. Curvas de Nivel o Isolíneas

Son líneas que conectan puntos contiguos de igual altura, en la TIN, las curvas de nivel se crean interpolando líneas rectas a través de cada triángulo que contiene algún valor en el rango de la curva, se determina donde la curva corta la cara (triángulo) mediante interpolación lineal entre los puntos que componen cada lado.

2.2.1.3. Pendiente

La pendiente representa el grado de cambio de la elevación del terreno en relación a la distancia. Esto es la primera derivada de la altitud en el espacio y se calcula según la siguiente ecuación:

$$\tan \beta = [(dZ/dX)^2 + (dZ/dY)^2]^{1/2} [m * m^{-1}]$$

$$\tan \beta = [G^2 + H^2]^{1/2}$$

Cálculo de la Pendiente del Terreno

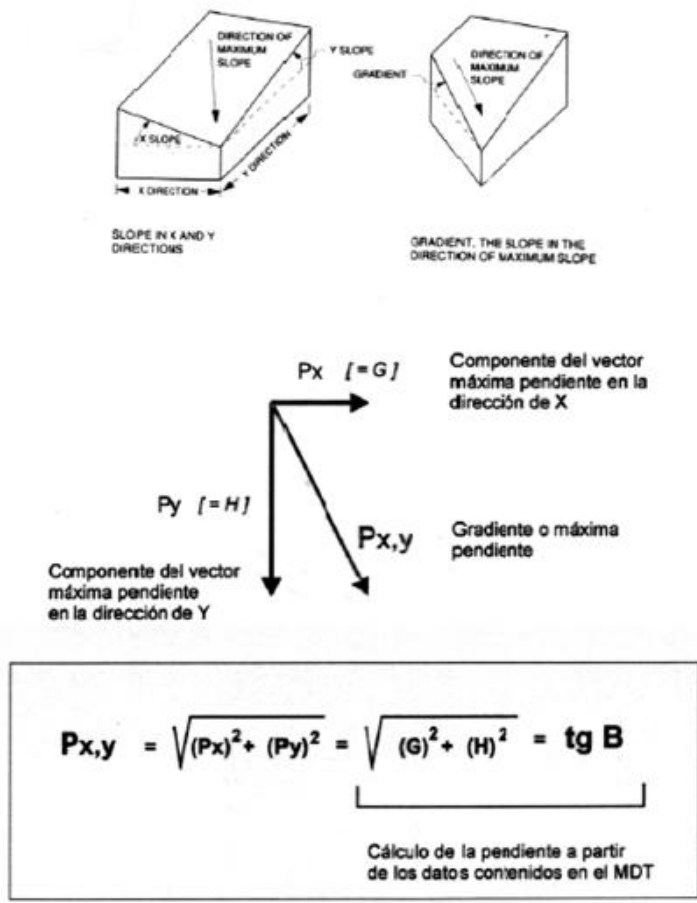


Figura 15. Cálculo de la pendiente del terreno

Los resultados de calcular la pendiente pueden ser obtenidos en porcentaje (%) como en grados (°).

2.2.1.4. Usos de suelo

Los datos del uso del suelo para el caso de estudio, la cuenca del río Aconcagua, se extraen de la información proporcionada por el Sistema de Información Territorial de Chile (<http://sit.conaf.cl/>).



Figura 16. Uso del uso – Región de Valparaíso, Sistema Territorial de Chile

A partir de la información del uso del suelo del sitio web del Sistema Territorial de Chile, se obtienen los datos relacionados con la zona de estudio: la cuenca del río Aconcagua, ubicada en la región de Valparaíso. La información del uso del suelo se extrae del archivo kmz que permite digitalizar el SIT.

2.2.1.5. Orientación del terreno

La orientación es calculada a partir del Modelo Digital del Terreno, es la dirección donde se produce el máximo grado de cambio en la altitud en cada celda con respecto a sus 8 vecinos.

La orientación del terreno:

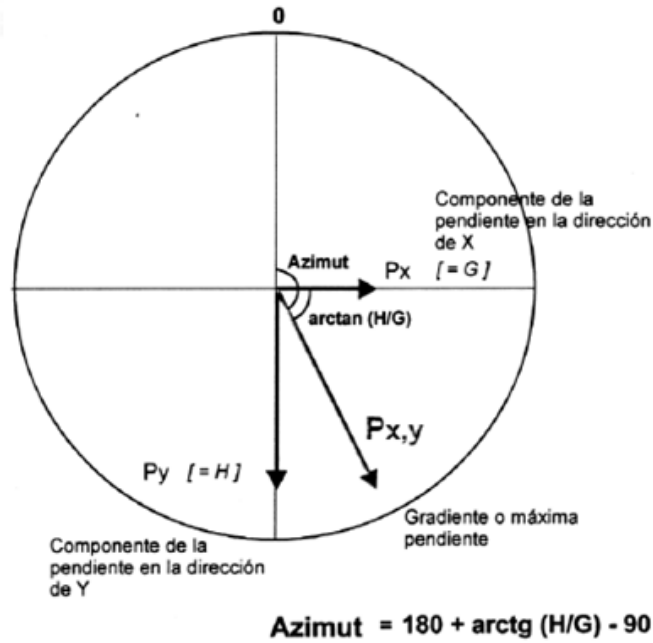
- Se calcula para cada triangulo del TIN.
- Se mide en el sentido de las agujas del reloj de 0 (norte) a 360.
- Las pendientes nulas no tienen dirección y llevan un valor -1.

Matemáticamente la orientación del terreno se calcula como:

$$\varphi = 180 - \arctan(H / G) + 90 (G / |G|)$$

Cálculo de la Orientación del Terreno

(Dirección donde se produce la máxima pendiente)



Azimut = 180 - arctg (H/G) + 90 (G/ |G|)

Figura 17. Cálculo de la orientación del terreno

Obtención de Clases de Exposición

(Reclasificación del Mapa de Orientaciones)

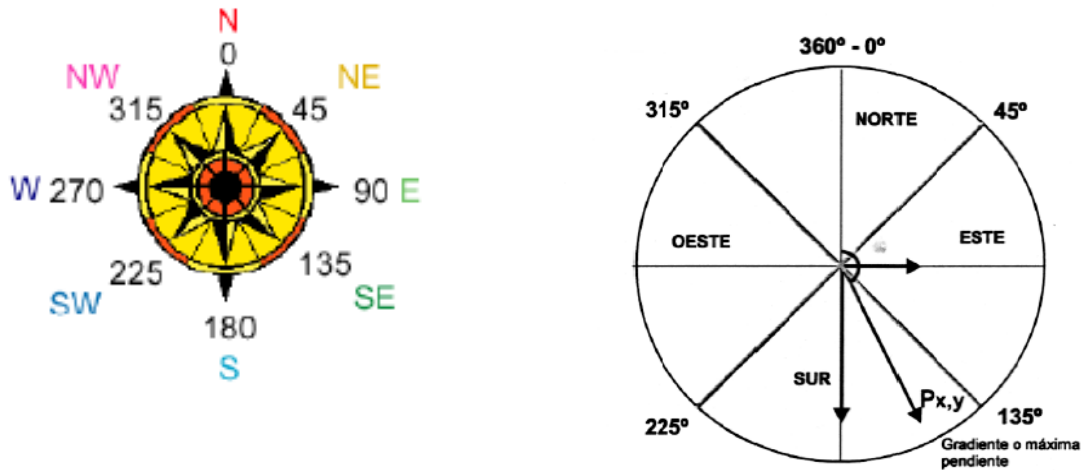


Figura 18. Orientación del terreno – Rosa de los vientos

2.2.1.6. Unidades de Respuesta Hidrológica

Las URHs son áreas de una cuenca que son homogéneas en términos de su respuesta hidrológica y características geo-climáticas.

En el software desarrollado, las URHs se trabajan a partir de propiedades comunes del terreno, como son:

- *Pendiente*: La pendiente de una cuenca influye en la cantidad y el desarrollo temporal de la escorrentía, determina la velocidad de la escorrentía superficial.
- *Elevación*: La cota es una de las características que influye en la magnitud de las principales variables meteorológicas (precipitación y temperatura) que se reciben en un punto; además el volumen de precipitación varía con la altura.
- *Aspecto*: especialmente en cuencas con nieve.
- *Orientación del terreno*: La orientación es fundamental por la radiación solar que se recibe e influye en el derretimiento de nieve y en el desarrollo de la vegetación por lo que hidrológicamente se comportan en forma hidrológicamente similar aquellas unidades que tienen las mismas características.
- *Usos de suelo*.

Para definir un grupo de URHs se elige una propiedad común para subdividir el área total de la cuenca; luego, se elige una segunda propiedad para obtener mayor detalle y así sucesivamente. No todas las propiedades mencionadas se utilizan en la definición de URHs, depende del criterio del modelador definir cuáles son las “propiedades dominantes” que se utilizarán en la definición.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y DISEÑO

3.1. METODOLOGÍA DE DESARROLLO DE SOFTWARE

La metodología para el desarrollo de software es un modo sistemático de realizar, gestionar y administrar un proyecto para llevarlo a cabo con altas posibilidades de éxito. Una metodología para el desarrollo de software comprende los procesos a seguir sistemáticamente para idear, implementar y mantener un producto software desde que surge la necesidad del producto hasta que cumplimos el objetivo por el cual fue creado. (Instituto Nacional de Tecnologías de la Comunicación. Laboratorio Nacional de Calidad del Software, 2009)

Para trabajar el ciclo de vida del desarrollo de la aplicación indicada en el objetivo general del presente documento, no se utilizó una metodología tradicional o ágil específica, sino, que se buscó aprovechar las ventajas y/o beneficios del desarrollo iterativo e incremental en conjunto con prácticas disciplinadas de la Programación Extrema (XP).

3.1.1. Modelo Iterativo e Incremental

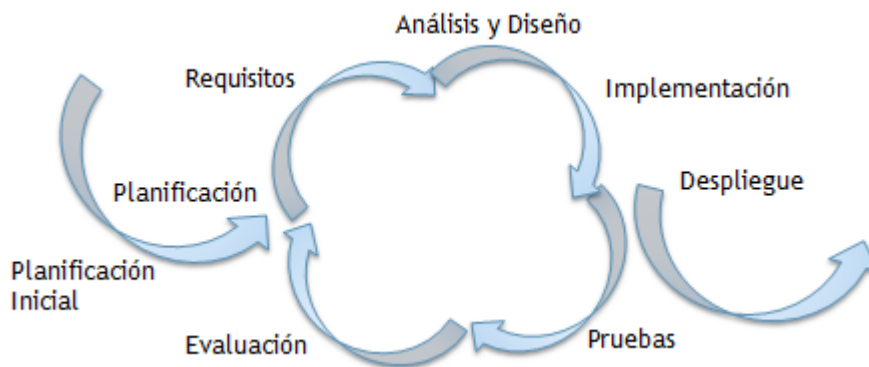


Figura 19. Modelo Iterativo e Incremental

Se escogió el desarrollo iterativo e incremental, por las siguientes razones:

- El desarrollo incremental es una estrategia programada y en etapas, en la que las diferentes partes del sistema se desarrollan en diferentes momentos o a diferentes velocidades, y se integran a medida que se completan.
- El desarrollo iterativo es una estrategia de programación de reproceso en la que el tiempo se separa para revisar y mejorar partes del sistema. Una diferencia típica es que la salida de un incremento no está necesariamente sujeta a más refinamiento, y sus pruebas o la realimentación del usuario no se usa como entrada para revisar los planes o especificaciones de los incrementos sucesivos.
- El desarrollo iterativo e incremental comienza con una planificación inicial seguido de distintas iteraciones sobre las etapas de planificación, requisitos, análisis y

diseño, implementación, pruebas y evaluación, hasta que el producto está listo para el despliegue.

3.1.2. Programación Extrema (XP)

El ciclo de vida ideal de XP consisten en 6 fases: exploración, planificación de la entrega, iteraciones, producción, mantenimiento y muerte del proyecto.

Los principios básicos de la programación extrema son: simplicidad, comunicación, retroalimentación y coraje (Instituto Nacional de Tecnologías de la Comunicación. Laboratorio Nacional de Calidad del Software, 2009). Los primeros tres principios fueron puestos en práctica en el desarrollo y construcción del software; el cuarto principio está orientado más a la programación en parejas, situación que no se presenta en éste trabajo.

- **Simplicidad:** la simplicidad es la base de la programación extrema. Se simplifica el diseño para agilizar el desarrollo y facilitar el mantenimiento. Para mantener la simplicidad es necesaria la refactorización del código, ésta es la manera de mantener el código simple a medida que crece. También se aplica la simplicidad en la documentación, de esta manera el código debe comentarse en su justa medida, intentando eso sí que el código esté autodocumentado. Para ello se deben elegir adecuadamente los nombres de las variables, métodos y clases.
- **Comunicación:** para los programadores el código comunica mejor mientras más simple sea. Las pruebas unitarias son otra forma de comunicación ya que describen el diseño de las clases y los métodos al mostrar ejemplos concretos de cómo utilizar su funcionalidad.
- **Retroalimentación (feedback):** el código también es una fuente de retroalimentación gracias a las herramientas de desarrollo. Por ejemplo, las pruebas unitarias informan sobre el estado de salud del código. Ejecutar las pruebas unitarias frecuentemente permite descubrir fallos debidos a cambios recientes en el código.

3.2. ETAPAS INICIALES - METODOLOGÍA

De las etapas: Planificación inicial, Planificación, Requisitos y Análisis del desarrollo iterativo e incremental se construyeron los siguientes artefactos:

3.2.1. Captura de Requerimientos

Teniendo en cuenta que el software desarrollado se centra en el procesamiento y modelamiento de información digital del terreno, se destacan los siguientes requerimientos que presta el sistema, clasificándolos en dos categorías o niveles.

3.2.1.1. Usuario

- ✓ Permitir generar y visualizar el modelo digital del terreno de la zona de estudio.
- ✓ Permitir cargar una ruta KML del río asociado a la zona de estudio.

- ✓ Permitir visualizar las coordenadas de la ruta del río en el modelo digital del terreno de la zona de estudio.
- ✓ Permitir visualizar curvas de nivel de la zona de estudio.
- ✓ Permitir visualizar bandas de elevación de la zona de estudio.
- ✓ Permitir visualizar mapa de pendientes de la zona de estudio.
- ✓ Permitir visualizar orientación del terreno de la zona de estudio.
- ✓ Permitir visualizar unidades de respuesta hidrológica de la zona de estudio.

3.2.1.2. Sistema

- ✓ Leer la información de las coordenadas del modelo digital del terreno y las coordenadas del río de la zona de estudio.
- ✓ Fusionar las coordenadas de la zona de estudio con las del río.
- ✓ Construir la red irregular de triángulos de la zona de estudio.
- ✓ Visualizar el modelo digital del terreno.
- ✓ Calcular y visualizar las curvas de nivel a partir de la TIN construida.
- ✓ Calcular y visualizar las bandas de elevación a partir de la TIN construida.
- ✓ Calcular y visualizar el mapa de pendientes a partir de la TIN construida.
- ✓ Calcular y visualizar la orientación del terreno a partir de la TIN construida.
- ✓ Calcular y visualizar las unidades de respuesta hidrológica a partir de la TIN construida.

3.2.2. Casos de Uso

Para comprender los requerimientos del sistema es necesario realizar un análisis sobre los escenarios en los que se construye la aplicación y también las acciones que conllevan a procesos y/o actividades, así como quién las realiza.

3.2.2.1. Actores

Usuario: Persona que utiliza la aplicación, puede trabajar con el modelo digital de la zona de estudio y utilizar los visores gráficos asociados a la red irregular de triángulos, bandas de elevación, mapa de pendientes, orientación del terreno y unidades de respuesta hidrológica.

Sistema: representa la herramienta software en sí y todos los cálculos y procesos para su correcto funcionamiento.

3.2.2.2. Escenarios

Representan cada uno de los casos de uso que se presentan en el diagrama general de casos de uso.

3.2.2.3. Diagrama General de Casos de Uso

Se presentan los casos de uso generales realizados por cada uno de los actores identificados para el presente proyecto. El diagrama general de casos de uso se detalla en el capítulo de los anexos.

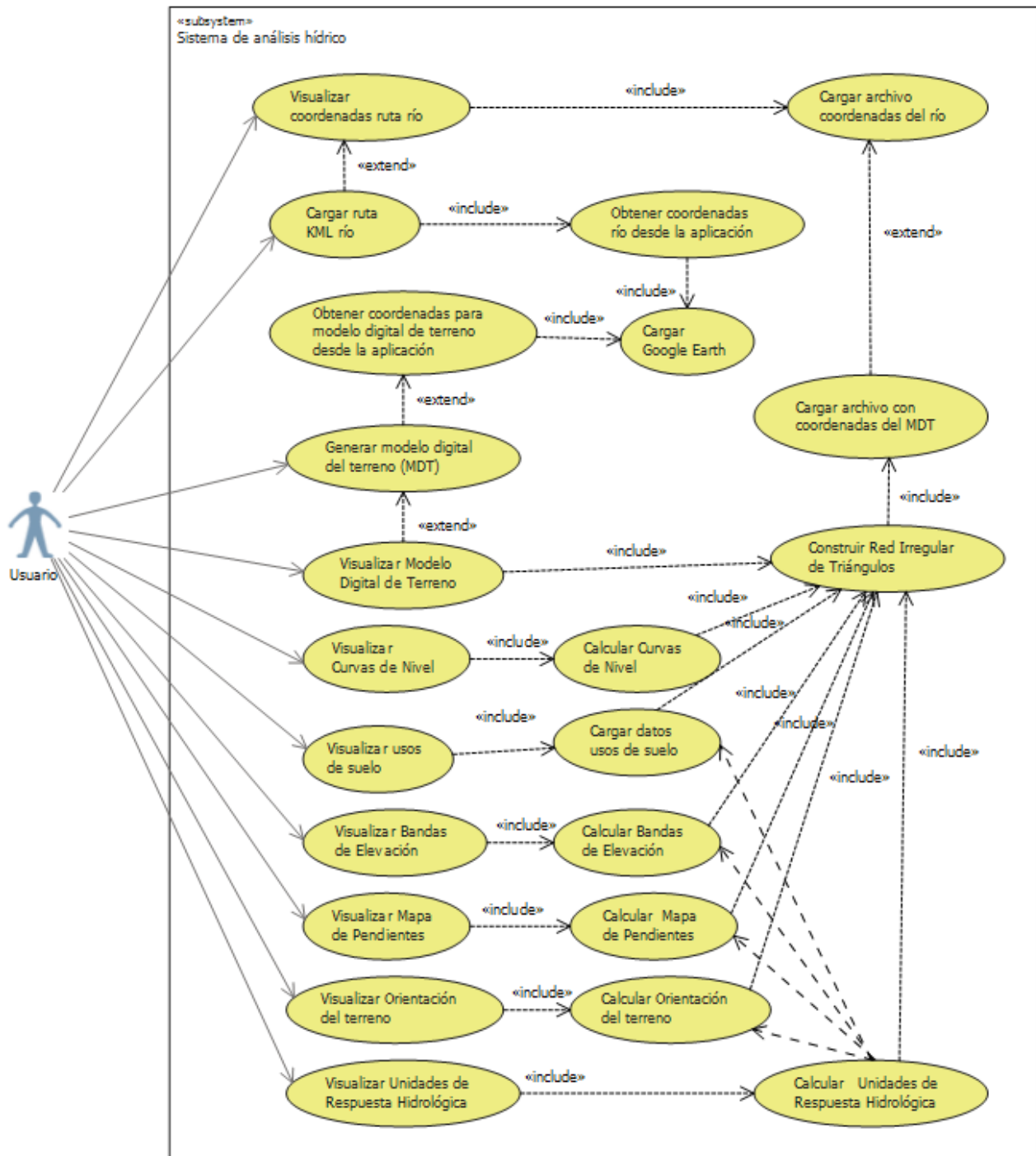


Figura 20. Diagrama general de casos de uso

3.3. ETAPA DE DISEÑO - METODOLOGÍA

En las etapas de Diseño e Implementación se hizo uso de algoritmos como el Algoritmo de Delaunay y la interpolación para el cálculo de las isolíneas, además se creó e implementó la lógica asociada a los algoritmos de refinamiento de los puntos del río,

divisoria de aguas, cálculo de ríos, pendientes del terreno, orientación del terreno, uso del suelo y cálculo de las URHs.

3.3.1. Algoritmos

A continuación se presenta el pseudocódigo de los algoritmos más importantes en el desarrollo de la aplicación.

3.3.2. Algoritmo de la Triangulación de Delaunay

El algoritmo básico de la triangulación de Delaunay que se utiliza inicialmente consiste en obtener a partir de la nube de puntos de la zona de estudios, una triangulación válida, es decir, obtener una triangulación que cumpla la condición de Delaunay: “*la circunferencia circunscrita de cada triángulo de la red no debe contener ningún vértice de otro triángulo*”, para lo cual se eliminan todas las aristas ilegales de la triangulación realizando las operaciones de *Test del Círculo e Intercambio de Diagonales* a cada triángulo, las cuales fueron explicada en el punto 2.2.1.1 Creación de una Red Irregular de Triángulos.

El algoritmo en pseudocódigo de la **Triangulación de Delaunay**, sería:

Entrada: Un conjunto finito de puntos en el plano.

Paso 1: Sean p_1 , p_2 y p_3 tres puntos tales que P está contenido en el triángulo que forman.

Paso 2: Inicializar T como una triangulación de un único triángulo (p_1 - p_2 - p_3).

Paso 3: Realizar una permutación cualquiera p_1, p_2, \dots, p_n de P .

Paso 4: Iterar sobre los puntos que van formando la triangulación T

Paso 5: Encontrar un triángulo p_i - p_j - p_k de T que contenga a p_r

Paso 6: Si p_r cae en el interior del triángulo p_i - p_j - p_k

Paso 7: entonces añadir aristas desde p_r a los tres vértices de p_i - p_j - p_k , dividiendo este triángulo en tres

Paso 8: legalizar lado (p_r, p_i - p_j, T)

Paso 9: legalizar lado (p_r, p_j - p_k, T)

Paso 10: legalizar lado (p_r, p_k - p_i, T)

Paso 11: en caso contrario (* p_r cae encima de uno de los lados del triángulo p_i - p_j - p_k , por ejemplo el lado p_i - p_j *)

Paso 12: Añadir aristas desde p_r a p_k y al tercer vértice p_l del otro triángulo que comparte la arista p_i - p_j , de esta forma dividimos los dos triángulos que comparten la arista p_i - p_j en cuatro triángulos.

Paso 13: legalizar lado (p_r, p_i - p_l, T)

Paso 14: legalizar lado (p_r, p_l - p_j, T)

Paso 15: legalizar lado (p_r, p_j - p_k, T)

Paso 16: legalizar lado (p_r, p_k - p_i, T)

Paso 17: descartar p_1, p_2 y p_3 y todas las aristas que parten de ellos de T

Paso 18: devuelve T

Salida: La triangulación de Delaunay del conjunto de puntos.

El algoritmo **legalizar lado**, comprueba la validez de la arista, si la arista es ilegal hace el flip correspondiente y chequea de nuevo la validez de los nuevos lados.

El algoritmo **legalizar lado**, en pseudocódigo sería:

Paso 1: El punto que se está insertando es pr , y $pi-pj$ es la arista de T a la que puede ser necesario hacer un intercambio de aristas

Paso 2: si $pi-pj$ es no válida

Paso 3: entonces, sea $pi-pj-pk$ el triángulo adyacente a $pr-pi-pj$ compartiendo la arista $pi-pj$

Paso 4: (* Flip $pi-pj$ *) Reemplazar $pi-pj$ por $pr-pk$

Paso 5: legalizar lado (pr , $pi-pk$, T)

Paso 6: legalizar lado (pr , $pk-pj$, T)

A diferencia de los dos algoritmos anteriores cuyos pseudocódigos son tomados a partir del planteamiento de su creador el matemático ruso Boris Nikolaevich Delone (De Berg, 2000), los siguientes algoritmos fueron creados para la construcción de la herramienta software del presente trabajo.

3.3.3. Refinamiento de los puntos del Río

El algoritmo para **refinar los puntos del río**, recorre los puntos de la ruta del río y los compara con los puntos del modelo digital del terreno, si un punto del modelo digital del terreno está ubicado entre los puntos del río, se considera este punto como parte del río.

Entrada: puntos del modelo digital del terreno y puntos de la ruta del río.

Paso 1: Recorrer los puntos de acuerdo a la red irregular de triángulos construida mediante el algoritmo de Delaunay.

Paso 2: Recorrer los puntos del río.

Paso 3: entonces, sea pi el primer punto de los puntos del río y pj el punto siguiente de los puntos del río.

Paso 4: Validar que el punto de la TIN no sea punto del río.

Paso 4.1: Si el punto de la TIN es punto del río, saltar al paso 6.1.2.

Paso 4.2: Si no, pasar al paso 5.

Paso 5: Por cada punto de la TIN preguntar si el punto se encuentra ubicado en medio de los puntos del paso uno.

Paso 6: Validar punto de la TIN.

Paso 6.1: Si el punto se encuentra en medio de los puntos del río, adicionar a los puntos del río.

Paso 6.1.1: Salir del paso 2.

Paso 6.1.2: Posicionarse sobre el siguiente punto de la TIN.

Paso 6.2: Si el punto no se encuentra en medio de los puntos del río.

Paso 6.1.2: Posicionarse pi en la posición del punto que tiene pj y pj se ubica en el punto siguiente.

Paso 6.1.3: Realizar los puntos desde el paso 4 hasta que se recorran todos los puntos de la TIN.

Salida: Puntos del río con un mayor número de puntos.

3.3.4. Calcular Divisoria de Aguas

El algoritmo para calcular la divisoria de aguas se realiza teniendo como punto de partida un punto proporcionado por el usuario, a la región de la TIN cercana a este punto se aplica el cálculo de la divisoria de aguas.

Entrada: puntos del modelo digital del terreno y punto de inicio sobre el cual se quiere calcular la divisoria de aguas.

Paso 1: Obtener el triángulo de la TIN que contiene el punto de inicio proporcionada por el usuario.

Paso 2: Recorrer los triángulos de la TIN que con vecinos o cercanos al triángulo del punto de inicio.

Paso 3: entonces, obtener los puntos con máximo valor de altura.

Paso 4: Validar que el punto del paso 3 forme con el triángulo adyacente de la TIN laderas de exposición opuesta.

Salida: Puntos que forman la divisoria de aguas.

3.3.5. Calcular Pendientes del Terreno

El algoritmo para **calcular la pendiente del terreno**, recorre todos los puntos del modelo digital del terreno y utiliza las clasificaciones de pendiente indicadas por el usuario.

Entrada: puntos del modelo digital del terreno y clasificación de las pendientes a utilizar.

Paso 1: Recorrer los puntos de acuerdo a la red irregular de triángulos construida mediante el algoritmo de Delaunay.

Paso 2: Calcular el máximo ángulo del triángulo.

Paso 3: Según valor del ángulo calculado en el paso 3, clasificarlo en la pendiente correspondiente.

Salida: Cálculo de la pendiente de cada triángulo de la TIN.

3.3.6. Calcular Orientación del Terreno

El algoritmo para **calcular la orientación del terreno**, recorre todos los puntos del modelo digital del terreno y utiliza las clasificaciones para la orientación del terreno indicadas por el usuario.

Entrada: puntos del modelo digital del terreno y clasificación de las orientaciones a utilizar.

Paso 1: Recorrer los puntos de acuerdo a la red irregular de triángulos construida mediante el algoritmo de Delaunay.

Paso 2: Calcular el azimut del triángulo.

Paso 3: Según valor del azimut calculado en el paso 3, clasificarlo en la orientación correspondiente.

Salida: Cálculo de la orientación de cada triángulo de la TIN.

3.3.7. Calcular Río

El algoritmo para calcular un posible río sobre la TIN se realiza teniendo como punto de partida un punto proporcionado por el usuario, a la región de la TIN cercana a este punto se aplica el cálculo de río.

Entrada: puntos del modelo digital del terreno y punto de inicio sobre el cual se quiere calcular el río.

Paso 1: Obtener el triángulo de la TIN que contiene el punto de inicio proporcionada por el usuario.

Paso 2: Recorrer los triángulos de la TIN que con vecinos o cercanos al triángulo del punto de inicio.

Paso 3: entonces, obtener los puntos con menor valor de altura.

Paso 4: Validar que el punto del paso 3 forme con el triángulo adyacente de la TIN laderas de exposición opuesta, es decir, que se forme un valle.

Salida: Puntos que forman la divisoria de aguas.

3.4. ETAPA DE IMPLEMENTACIÓN - METODOLOGÍA

La herramienta de software se construyó en el lenguaje de programación Java mediante el entorno de desarrollo IntelliJ versión comunitaria.

A continuación se presenta el diagrama de clases y/o el código utilizado en la construcción de los algoritmos presentados en la etapa de diseño.

3.4.1. Algoritmo Triangulación de Delaunay

Para la construcción del algoritmo de Delaunay existen diversos algoritmos que sirven para crear una triangulación de Delaunay a partir de una nube de puntos.

Entre éstos algoritmos tenemos:

- ♦ **Algoritmo Incremental:** Este algoritmo comienza con un súper triángulo o la triangulación de un rectángulo cuyo interior contiene todos los puntos de P. en cada iteración, el algoritmo introduce un punto de P a la triangulación, primero buscando el triángulo que contiene a dicho punto, para luego dividir el triángulo que contiene al punto en tres. Los nuevos triángulos y sus vecinos son revisados para garantizar que la triangulación de Delaunay sea válida.
- ♦ **Algoritmo basado en dividir para conquistar:** Este algoritmo divide recursivamente P en mitades, calcula la triangulación de Delaunay para ambas mitades y une el resultado a sus respectivas triangulaciones. Los casos base ocurren cuando un conjunto posee dos puntos y su triangulación de Delaunay es simplemente la arista que une ambos puntos, y cuando un conjunto posee tres puntos y su triangulación es un único triángulo. La mayor parte del trabajo ocurre en la rutina para unir las triangulaciones de Delaunay resultantes de procesar cada mitad por separado.

En la implementación de la herramienta se hizo uso del algoritmo incremental que ofrece **Jzy3d**⁵ la librería de Java de código abierto, que permite dibujar fácilmente datos científicos en 3d: superficies, diagramas de dispersión, gráficos de barras, y muchas otras primitivas en 3D.

Las clases involucrada en la Triangulación de Delaunay se detalla a continuación:

- ◆ ***Delaunay_Triangulation***, Esta clase representa una triangulación de Delaunay. La clase fue escrito para una triangulación a gran escala (1000 - 200.000 vértices). Las propiedades principales de clase son los siguientes:
 - Ubicación del punto rápido. ($O(n^{0,5})$), tiempo de ejecución práctica es a menudo muy rápido.
 - Se encarga de los casos degenerados y ninguna entrada de posición general (ignora puntos duplicados).
 - Guardar y carga de un archivo de texto en formato Norte, Este, Cota.
 - Soporte 3D: incluyendo aproximación valor z.
 - Java estándar (1.6 o superior) iteradores para los vértices y triángulos.
 - Iterador inteligente sólo los triángulos actualizados y para simplificación del terreno
- ◆ ***BoundingBox***, esta clase representa un rectángulo de delimitación horizontal definido por un punto inferior izquierdo y un punto superior derecho. Esto se utiliza generalmente como una aproximación de la geometría acotada.
- ◆ ***Circle_dt***, esta clase representa un círculo simple y es utilizado por la clase triangulación de Delaunay.
- ◆ ***Point_dt***, esta clase representa un punto 3D, con algunos métodos geométricos simples.
- ◆ ***Compare***, esta clase permite la comparación entre puntos.

En el software desarrollado, al obtener el MDT desde Google Earth y generar una nube de puntos éstos no son puntos uniformes, ya que la conversión de coordenadas geográficas (latitud, longitud) a UTM las deforma y no son completamente rectangulares.

⁵ <http://jzy3d.org/>

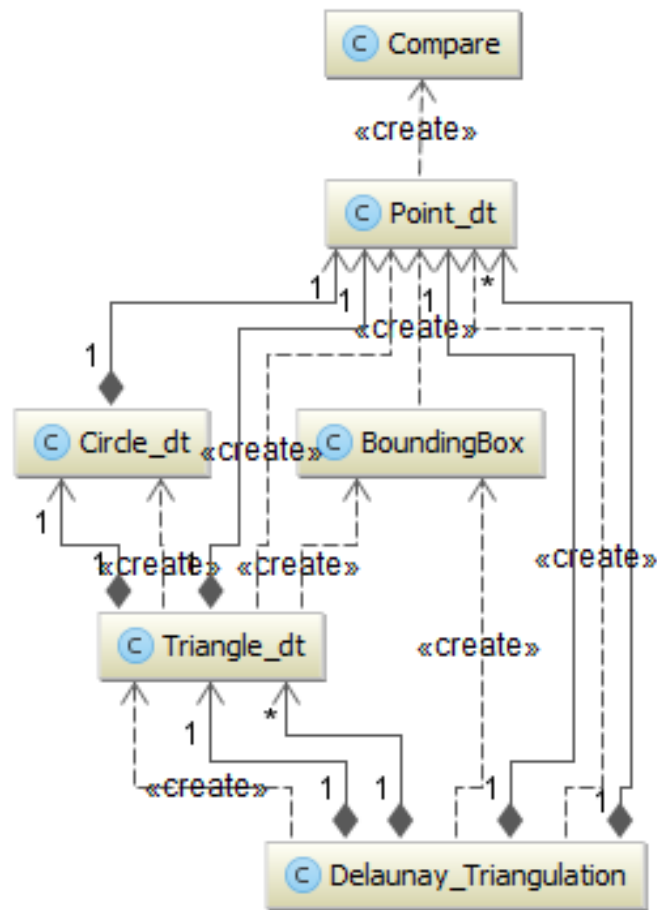


Figura 21. Diagrama de clases Triangulación de Delaunay

3.4.2. Algoritmo Divisoria de Aguas

La divisoria de aguas toma como punto de entrada un punto dado por el usuario sobre la red irregular de triángulos, este punto debe ser sobre o cercano al río preferiblemente, a partir de éste punto se busca las alturas máximas que conformarán la divisoria de aguas, con ésta información se trabaja el algoritmo a partir del siguiente pseudocódigo.

Algoritmo **calcularDivisoriaAguas**

Input: Triangulación Delaunay, puntoEntrada

Output: Lista<PuntosDivisoria>

Inicio

Triángulo tp -> obtenerTrianguloDelPuntoEntrada(delaunay, puntoEntrada)
 Numero alturatp -> calcularValorAlturaPuntoEntrada(Triángulo tp, Punto puntoEntrada)

Recorrer triangulación Delaunay

triángulosVértices -> encontrar_triángulos_vértices_del_punto_entrada

Triángulo ts -> triángulo_vértice_mayor_altura

Triángulos ti, tj -> Triángulos_lados_tp_a_ts

Validar si los triángulos ti, tj forman con respecto a los puntos tp, ts laderas adyacentes de posición opuesta y de menor altura.

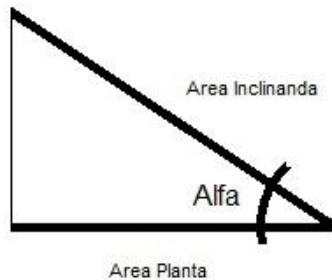
Si los triángulos t_i , t_j son laderas adyacentes de posición opuesta con respecto a los triángulos t_p , t_s , se adiciona t_s a la lista de puntos de divisoria de aguas.

Si no, se adiciona éste punto a una lista auxiliar que será recorrida como se recorrió la triangulación de Delaunay con el fin de encontrar los puntos que harán parte de la divisoria de aguas.

Fin recorrido triangulación Delaunay

3.4.3. Algoritmo Pendiente del Terreno

Para calcular la pendiente del terreno, se calcula el máximo ángulo del triángulo, como se muestra en la figura, donde el triángulo en planta es el cateto adyacente y el área inclinada es la hipotenusa.



$$\cos(\text{Alfa}) = \frac{\text{AreaPlanta}}{\text{AreaInclinada}}$$

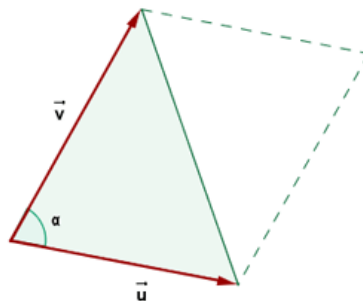
Figura 22. Máximo ángulo pendiente del terreno

El **área en planta** se obtiene mediante el cálculo del área del triángulo por determinantes, a partir de las coordenadas del triángulo

$$A = \frac{1}{2} \cdot \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & 1 \\ b_1 & b_2 & 1 \\ c_1 & c_2 & 1 \end{vmatrix}$$

Figura 23. Área del triángulo por determinantes

El **área inclinada** se calcula por vectores.



$$A = \frac{1}{2} |\vec{u} \cdot \vec{v}|$$

Figura 24. Área del triángulo por vectores

Antes de calcular el ángulo, se debe cumplir que el área del triángulo inclinado tiene que ser mayor o igual a la del triángulo en planta.

3.4.4. Algoritmo Orientación del Terreno

Retorna la dirección en planta del plano definido por p1,p2, p3, da siempre un ángulo entre 0° y 360°.

Para encontrar la dirección del triángulo se hace uso de la normal, donde:

N (normal) = (ai, bj, ck), donde, ck = 0.

Sea p1 un punto en X, p2 un punto en Z, p3 un punto en Y
 $N = v \times w$, la normal es igual al producto cruz de los vectores v y w,

Donde:

v, trabaja sobre los ejes x,y, es decir entre el punto1 y punto3.
 w, trabaja sobre los ejes x,z, es decir entre el punto1 y punto2.

V (x₁₃, y₁₃, z₁₃)
 W (x₁₂, y₁₂, z₁₂)

$$N = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_{13} & y_{13} & z_{13} \\ x_{12} & y_{12} & z_{12} \end{vmatrix}$$

$$i \begin{vmatrix} y_{13} & z_{13} \\ y_{12} & z_{12} \end{vmatrix} - j \begin{vmatrix} x_{13} & z_{13} \\ x_{12} & z_{12} \end{vmatrix} + k \begin{vmatrix} x_{13} & y_{13} \\ x_{12} & y_{12} \end{vmatrix}$$

Donde:

- El determinante de i, representa a.
- El determinante de j, representa b.
- El determinante de k, representa c, pero este vale cero.

A partir de a que representa la coordenada en el eje X y b que representa la coordenada en el eje Y, se calcula el azimut para encontrar el ángulo entre el eje x y y, como se indica a continuación

$$\text{ángulo} = \arctan | a/b | * (180 / \text{PI})$$

- si, a >= 0, =>
- si, b = 0, =>
- Azimut = 90°
- si, b > 0, =>

Azimut = ángulo
 seno,
 Azimut = $180^\circ - \text{ángulo}$
 seno
 si, $b = 0$, =>
 Azimut = 270°
 si, $b > 0$, =>
 Azimut = $360^\circ - \text{ángulo}$
 seno,
 Azimut = $180^\circ + \text{ángulo}$

De acuerdo al valor del ángulo obtenido se indica la orientación del terreno, de acuerdo a la ubicación del valor en la rosa de los vientos.

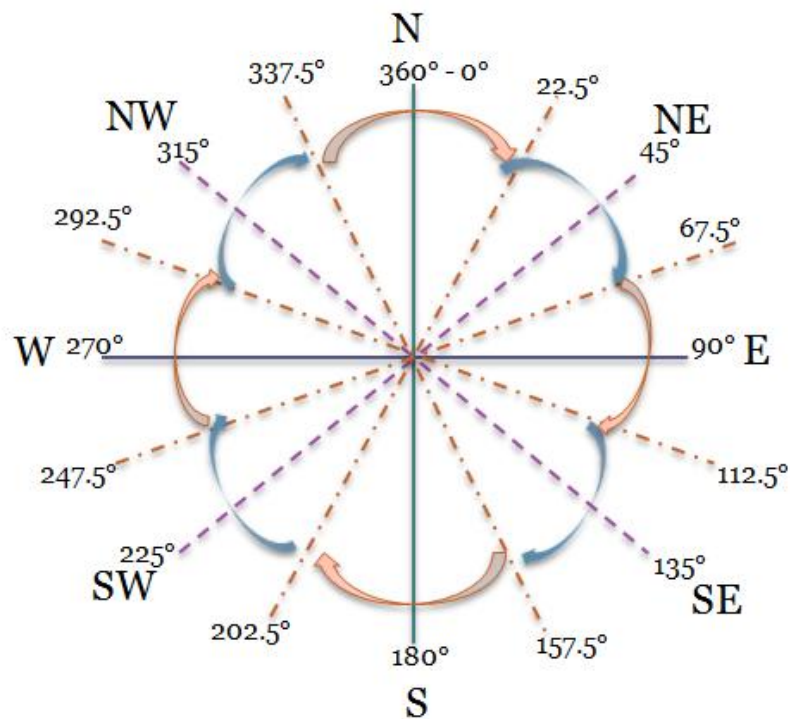


Figura 25. Rosa de los vientos para la dirección del terreno

3.4.5. Algoritmo Uso de Suelo

Los datos relacionados con el uso del suelo se trabajan a partir de la información de las coordenadas de los polígonos que encierra el uso del suelo, por este motivo es necesario saber qué puntos de la red irregular de triángulos hacen parte del polígono de cada uso de suelo, para determinar si un punto está dentro de un polígono se utiliza la lógica del algoritmo "**Trazado de rayos**", que consiste en trazar una línea con origen en el punto designado por el usuario paralela a alguno de los ejes (X ó Y).

Analíticamente, cuentas el número de intersecciones que se producen con cada una de las líneas del polígono:

- Si el número de intersecciones es impar, entonces está dentro.
- Si el número de intersecciones es par, entonces está fuera.

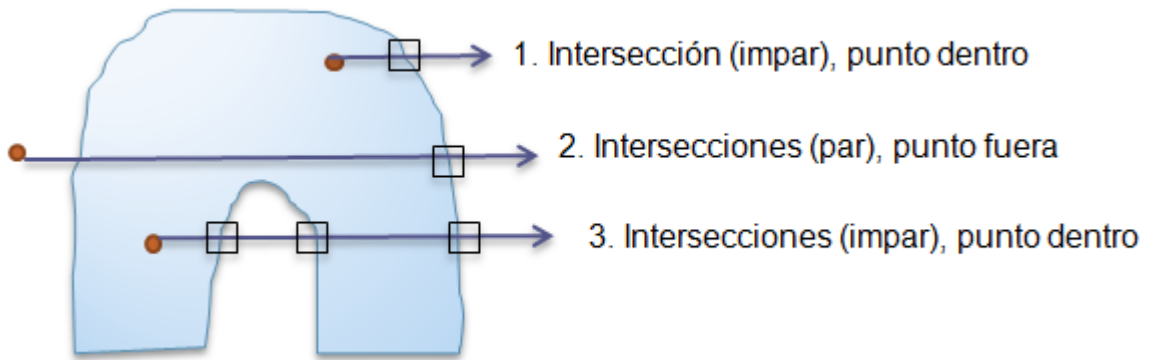


Figura 26. Trazado de rayos

3.4.6. Algoritmo Cálculo del Río

El cálculo del río toma como punto de entrada un punto dado por el usuario sobre la red irregular de triángulos, a partir de este punto se busca las alturas mínimas que conformarán la ruta del río, con ésta información se trabaja el algoritmo a partir del siguiente pseudocódigo.

Algoritmo calculoRio

Input: Triangulación Delaunay, puntoEntrada

Output: Lista<PuntosDivisoria>

Inicio

Triángulo tp -> obtenerTrianguloDelPuntoEntrada(delaunay, puntoEntrada)
 Numero altura tp -> calcularValorAlturaPuntoEntrada(Triángulo tp, Punto puntoEntrada)

Recorrer triangulación Delaunay

triángulosVértices -> encontrar_triángulos_vértices_del_punto_entrada

Triángulo ts -> triángulo_vértice_menor_altura

Triángulos ti, tj -> Triángulos_lados_tp_a_ts

Validar si los triángulos ti, tj forman con respecto a los puntos tp, ts laderas adyacentes de posición opuesta y de mayor altura, es decir, que se forme un valle.

Si los triángulos ti, tj son laderas adyacentes de posición opuesta con respecto a los triángulos tp, ts, se adiciona ts a la lista de puntos de la ruta del río.

Si no, se adiciona éste punto a una lista auxiliar que será recorrida como se recorrió la triangulación de Delaunay con el fin de encontrar los puntos que harán parte de la ruta del río.

Fin recorrido triangulación Delaunay

Este algoritmo permite construir posibles redes de drenaje en el modelo digital de la zona de estudio.

3.5. HERRAMIENTAS EXTERNAS UTILIZADAS

En el desarrollo de la aplicación se hizo uso de herramientas externas como:

3.5.1. Google Earth

Esta aplicación se utiliza dentro de la aplicación construida.

Google Earth es un programa informático que muestra un globo virtual que permite visualizar múltiple cartografía, con base en la fotografía satelital. El mapa de Google Earth está compuesto por una superposición de imágenes obtenidas por imagen satelital, fotografía aérea, información geográfica proveniente de modelos de datos SIG de todo el mundo y modelos creados por computador. El programa está disponible en varias licencias, pero la versión gratuita es la más popular, disponible para móviles, tablets y PCs.

3.5.2. Topo3

TOPO3 <http://www.topo3.com>, es un programa de computador diseñado para procesar datos topográficos en ingeniería, diseño de vías, cálculo de volúmenes de tierra y de agua en embalses.

TOPO3, está diseñado en entorno Windows, con base en ventanas y cajas de diálogo, siendo así un programa fácil de utilizar, funciona bajo el sistema operativo WINDOWS 98, 2000, Vista, 7, 8, ó NT y en cualquier computador personal a 32 ó 64 bits.

El software TOPO3 tiene entre otras las siguientes características:

- a. Entorno gráfico propio el cual es muy amable y de fácil uso.
- b. Cálculo de coordenadas en levantamientos topográficos.
- c. Genera la triangulación (TIN) y el modelo digital de un terreno (MDT).
- d. Permite trazar el eje de una vía, definiendo en cada PI los tipos de curvas contemplados en el Manual de Diseño Geométrico de INVIAS.
- e. Traza la rasante de la vía, colocando en cada PIV una curva vertical.
- f. Define la sección transversal de la carretera de una forma ágil, permitiendo la creación de carriles variables, terceros carriles, ensanchamiento de la vía, dobles calzadas, peraltes y bombeos variables, etc.
- g. La transición de peraltado es automática.
- h. Calcula el volumen de movimiento de tierras requerido para la explanación de la vía, el volumen de material requerido para la construcción de la estructura, el volumen de terreno afectado por el diseño geométrico.
- i. Permite realizar un chequeo del diseño comparándolo con las especificaciones de INVIAS.
- j. Señaliza la vía, colocando las señales preventivas verticales (SP01, SP02, etc.) y la demarcación horizontal cumpliendo con las distancias de visibilidad de adelantamiento y frenado especificadas por INVIAS.
- k. Exporta toda la información a AutoCAD (Planos en planta, perfil, secciones transversales, transición de peraltado, planos planta - perfil) y Hoja electrónica Excel (tablas con elementos de curvas, volúmenes, etc.).
- l. Importa información de AutoCAD y de Hoja Electrónica (Microsoft Excel)

CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

El software construido para el modelado de cuencas hidrológicas permite trabajar la información del terreno de la cuenca hidrográfica de la zona de estudio de la siguiente manera:

4.1. MODELO DIGITAL DEL TERRENO

La información relacionada con el modelo digital del terreno en la aplicación, se trabaja a partir de:

4.1.1. Archivo plano

Las coordenadas del terreno deben estar expresadas en coordenadas UTM (x,y,z), separadas por comas; el formato del archivo debe ser texto (.txt).

```
356093.6094454181,    6363903.35745351,    1195.4308188588718
356108.0595121591,    6363902.515911319,    1192.3378813922113
356121.3284344371,    6363900.921233702,    1187.0778272256034
356147.91539592354,    6363897.64993305,    1176.3155668743073
356161.2850441603,    6363896.004912855,    1170.9036688205472
356174.7062671033,    6363894.353537058,    1165.4707947774862
```

...

Figura 27. Ejemplo archivo MDT.txt

4.1.2. Google Earth

Para utilizar esta funcionalidad dentro de la aplicación, se debe tener instalado obligatoriamente el software de Google Earth, en caso de no tenerla instalada se puede descargar de la dirección:

<http://www.google.com/earth/download/ge/agree.html>

Si no se cuenta con la información asociada al terreno, la aplicación permite hacer uso de Google Earth embebido dentro del software desarrollado, para ubicar la zona de estudio y de ahí obtener el modelo digital del terreno; esta funcionalidad permite obtener una nube de máximo 40.000 puntos distribuidos a lo largo de la zona de estudio ubicada en Google Earth, la nube de puntos que representa el modelo digital del terreno es escrita en un archivo de salida, ubicado en la ruta C://FileHydro/MDT.txt, este archivo contiene las coordenadas UTM (x,y,z), separadas por comas. (Figura 27).

Para utilizar Google Earth desde la aplicación y obtener el modelo digital del terreno, se debe seleccionar la opción “**Google Earth**”, del menú “Vista -> Google Earth -> Google Earth”.

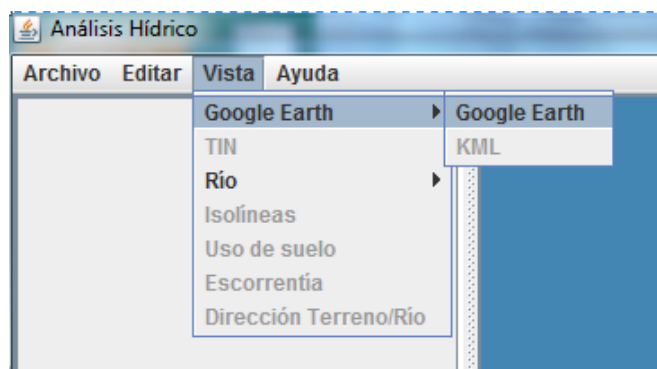


Figura 28. Opción Google Earth

Una vez se da clic en la opción Google Earth, la aplicación carga Google Earth; para poder ubicar la zona de estudio, en el lado izquierdo se debe ingresar una coordenada geográfica de referencia en grados sexagesimales o en grados decimales que permita ubicar la zona de estudio (círculo amarillo-Figura 29) y una altura al ojo, que permite indicar que tan cerca o lejos se verá la zona de estudio. (Círculo color verde - Figura 29)

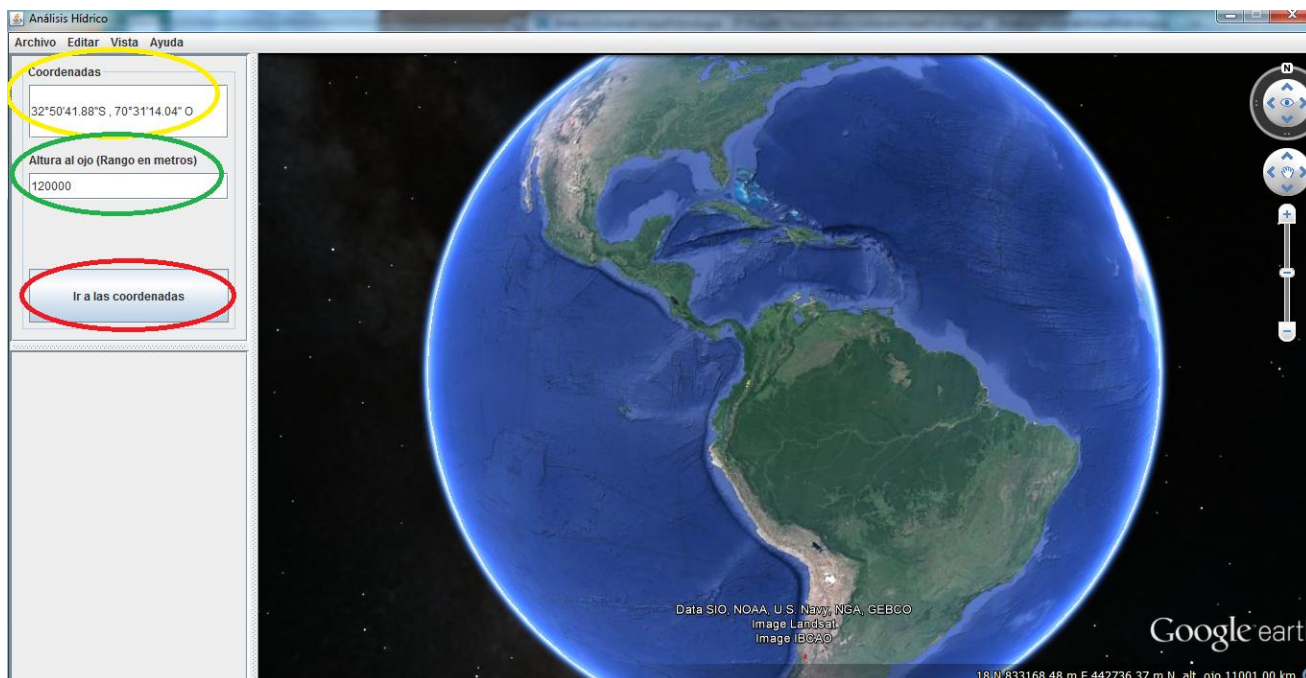


Figura 29. Google Earth en la aplicación

Una vez escrita la coordenada de referencia y la altura al ojo deseada, se debe dar clic sobre el botón “Ir a las coordenadas”. (Círculo rojo- Figura 29)

Google Earth (GE) se dirigirá a la zona geográfica a la cual pertenezcan las coordenadas de referencia. (Círculo rojo - Figura 30), GE mostrará las coordenadas (Latitud/Longitud) según el sistema que esté configurado, las coordenadas pueden visualizar sus valores en:

- Grados decimales.

- Grados, minutos, segundos.
- Grados, minutos decimales.
- Universal Transversal de Mercator.

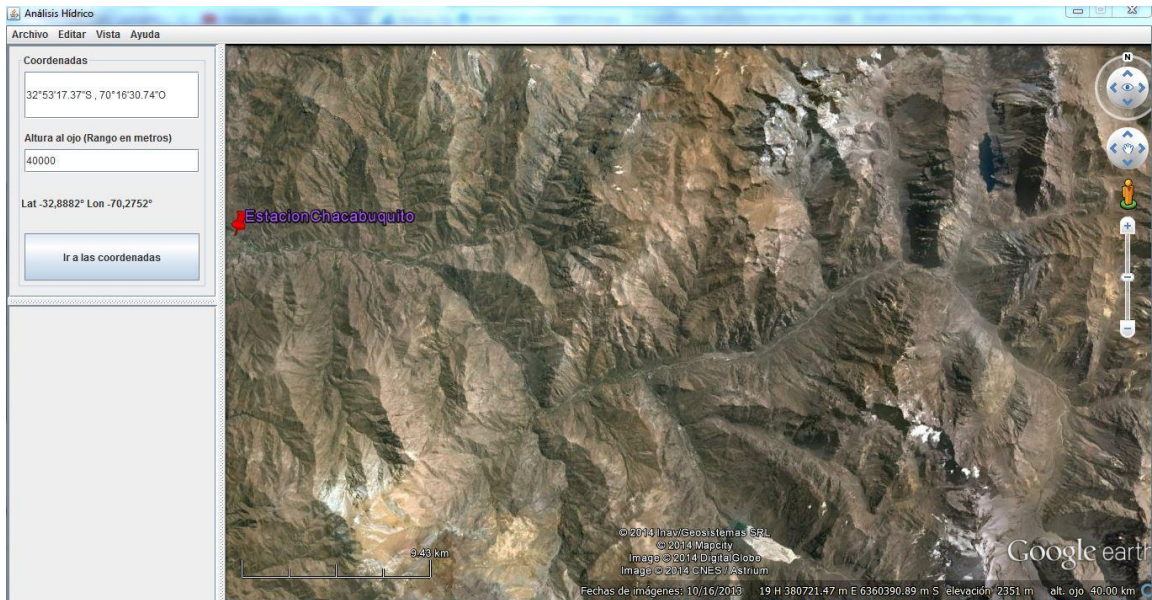


Figura 30. Zona de estudio en Google Earth

4.1.2.1. Ruta Río

Si se cuenta con la ruta del río en formato KML o se ha creado a partir de algún programa informático como Google Earth (GE), la aplicación permite trabajar la ruta del río en el GE que cargó la aplicación.

Una vez ubicada la zona de estudio según lo indicado en el punto 3.2, debe dirigirse al menú *Vista -> Google Earth -> KML* (Figura 31), aquí debe cargar el archivo kml de la ruta del río de la zona de estudio.

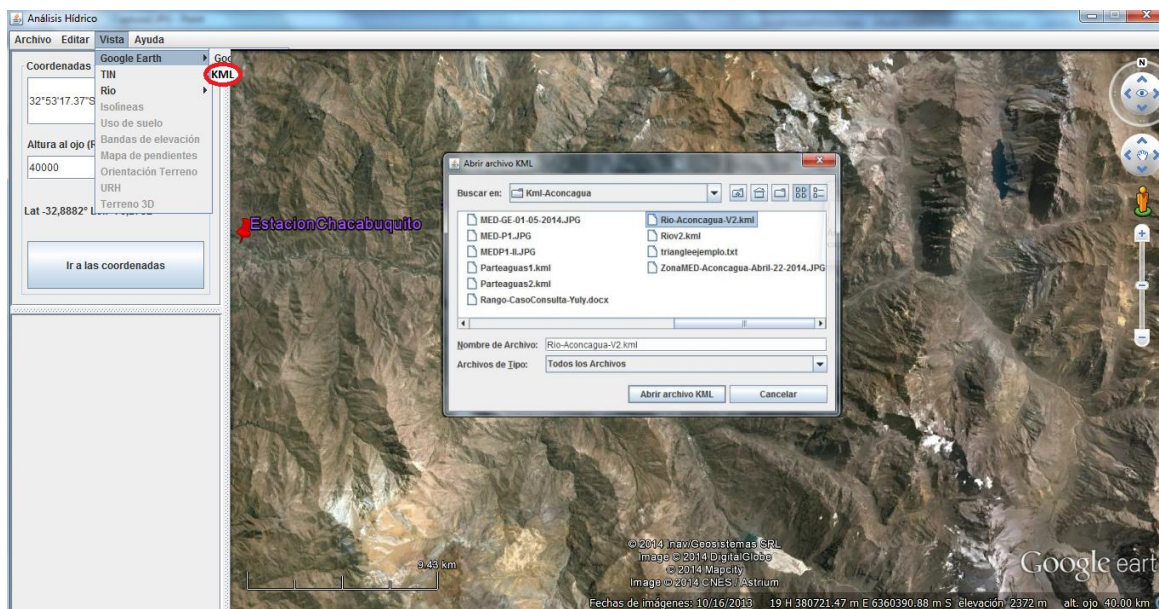


Figura 31. Ruta Río en GE

Una vez se carga el archivo KML que contiene la ruta del río de la zona de estudio, ésta se visualiza gráficamente en la aplicación.

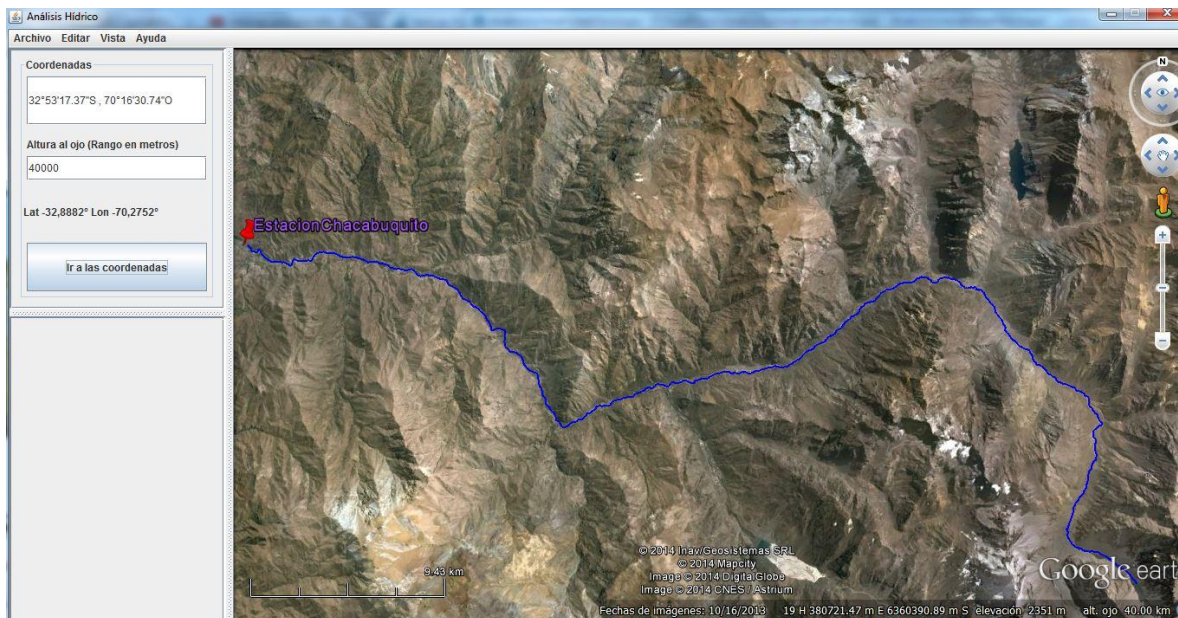


Figura 32. Ruta río archivo KML

4.1.2.2. Modelo digital del terreno a partir de Google Earth

Para obtener el modelo digital del terreno de la zona de estudio y del río a partir de los puntos 3.2 y 3.2.1, en la aplicación se debe utilizar la opción “Vista -> **TIN**”, la aplicación comienza a construir la nube de puntos de la zona indicada; esta nube de puntos contiene tanto coordenadas de la zona de estudio como del río.

Cuando la aplicación termina de obtener la nube de puntos, ésta es escrita en un archivo plano en la ruta C://FileHydro/ MDT&Rio.txt. Además las coordenadas asociadas a la ruta del río son escritas en el archivo rio.txt en la ruta C://FileHydro, estos archivos cumplen lo indicado en el punto 3.1.

4.1.2.3. Visualización del modelo digital del terreno

Para visualizar gráficamente el modelo digital del terreno, debe cargar en la aplicación el archivo .txt que contiene la información digital del terreno mediante la opción “**Archivo ->Abrir -> Archivo de texto**”.

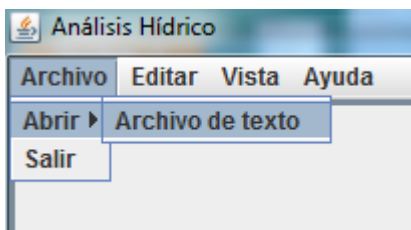


Figura 33. Cargar archivo de texto del MDT

El modelo digital del terreno correspondiente a la información del archivo de texto, se visualiza gráficamente como se muestra en siguiente figura.

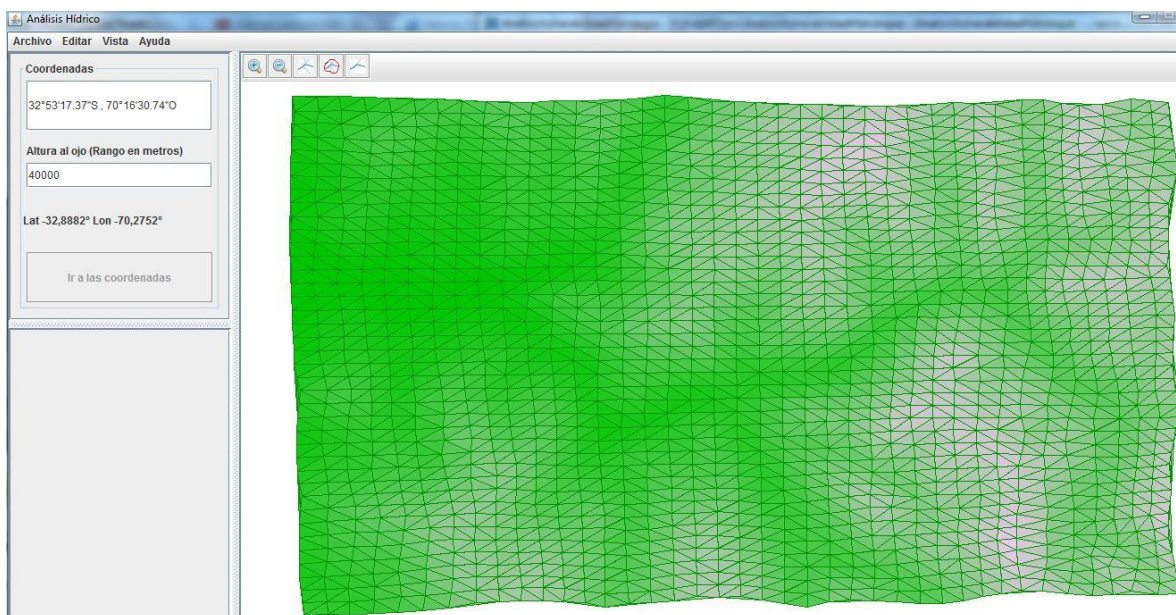


Figura 34. MDT y Río de la zona de estudio.

4.1.2.4. Visualización del Río en el Modelo Digital del Terreno

Para visualizar el río en el modelo digital del terreno, se cuenta con dos opciones:

1. **Archivo plano**: mediante el uso de un archivo de texto, formato .txt, se puede cargar la información del río de la zona de estudio mediante la opción “Vista -> Río -> **Ver Río**”.

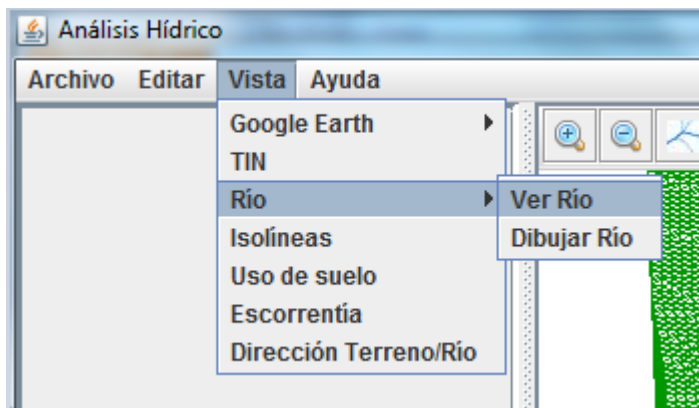


Figura 35. Ver río en MDT.

El archivo de texto a cargar debe corresponder con la información del archivo kml de la ruta del río. (Punto 3.2.2). Una vez cargada la información visualizará el río sobre el MDT como se indica en la siguiente figura.

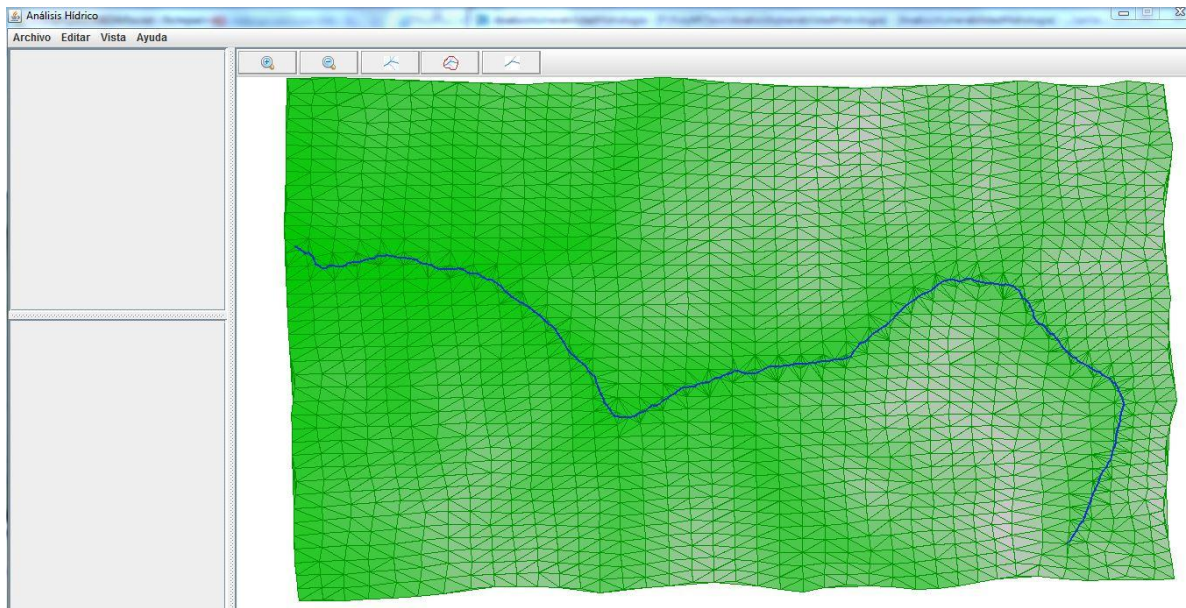


Figura 36. Río en el MDT

Si la ruta del río fue creada a partir de Google Earth, la información digital del río al momento de visualizarla sobre el modelo digital del terreno de la zona de estudio puede quedar inconsistente a nivel de la triangulación, es decir, si al seleccionar una porción del río y ampliarla (Figura 37), la ruta del río (color azul) no está sobre la triangulación, se necesita refinar el río. (Figura 38, círculos en color rojo).

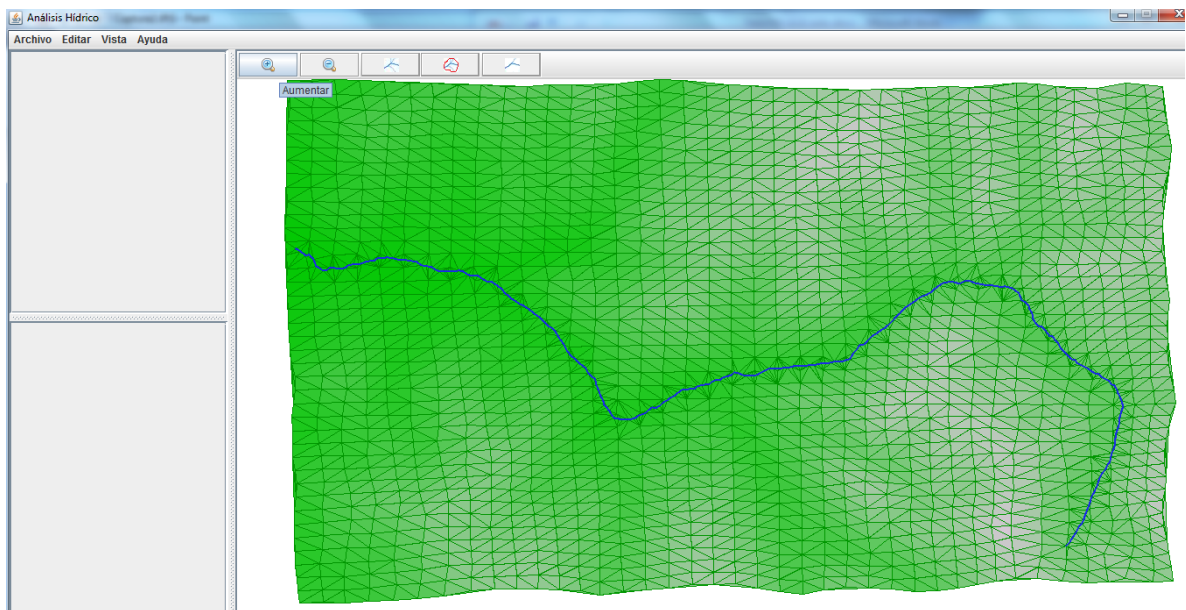


Figura 37. Ampliación porción del río

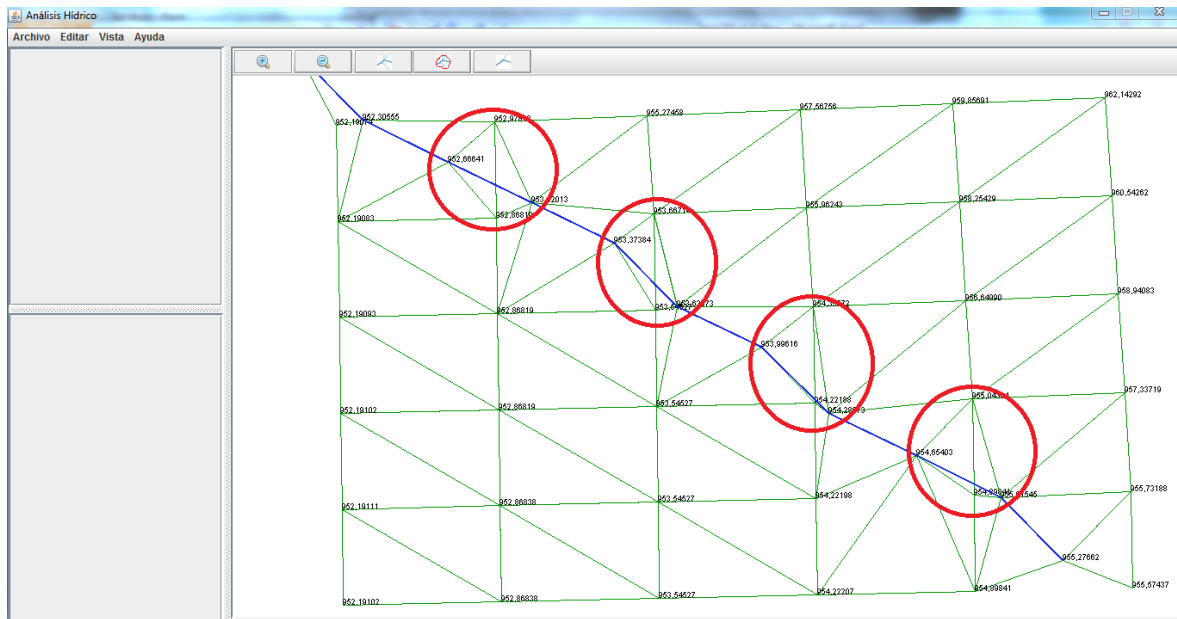


Figura 38. Inconsistencias en la ruta del río.

La aplicación cuenta con la opción “Refinar río” para ajustar la información digital de la ruta de GE al modelo digital del terreno de la zona de estudio (Figura 39)

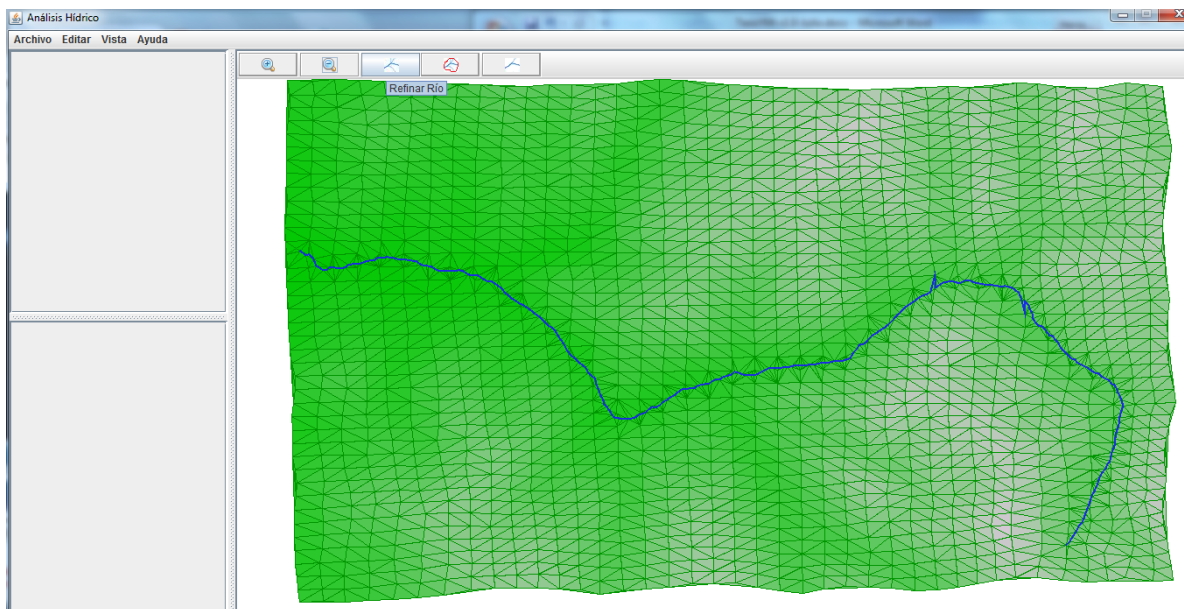


Figura 39. Refinar ruta del río.

La aplicación genera el archivo rio-calculado.txt en la ruta C:\FileHydro\ éste archivo contiene las coordenadas iniciales del río y aquellas que forman líneas de quiebre en el modelo digital del terreno.

Para ver el río que fue refinado, se debe cargar el archivo “rio-calculado.txt”, se escoge una porción de la ruta del río, se amplía la zona y se analiza si la ruta del río está sobre la triangulación (Figura 40), a diferencia de la ruta del río en la Figura 38.

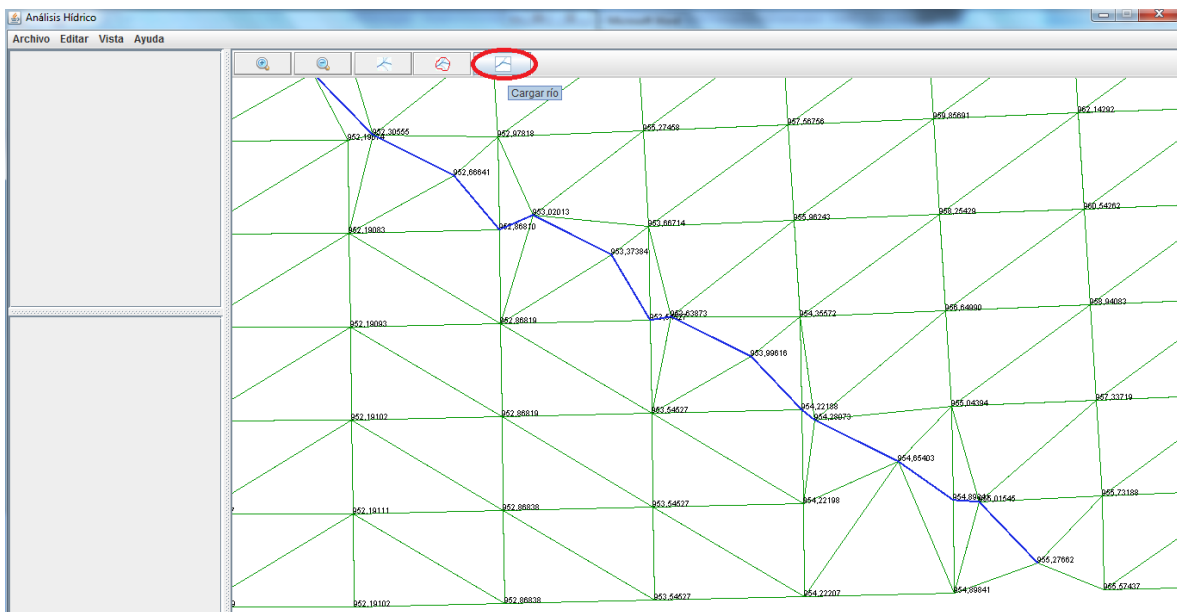


Figura 40. Río refinado

2. **Dibujar el río:** la aplicación ofrece la opción de dibujar el río a partir del modelo digital del terreno de la zona de estudio, aquí se debe proporcionar un punto inicial del río, la aplicación busca obtener aquellas coordenadas del terreno que sean terrenos valle, es decir, se obtiene aquellas coordenadas cercanas al punto inicial que cuentan con una altura de terreno baja o mínima.

Esta funcionalidad está en el menú "Vista -> Río -> Dibujar Río".

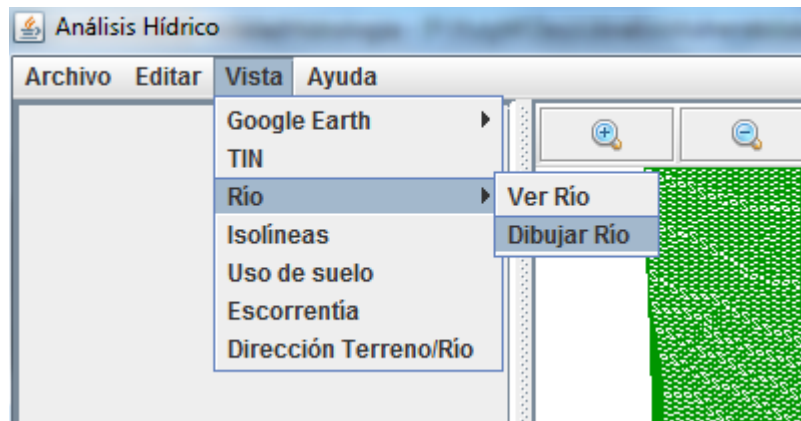


Figura 41. Dibujar río

En la siguiente figura, el punto de inicio del río está indicado con el círculo rojo, en las coordenadas de la pantalla indicadas en el mensaje.

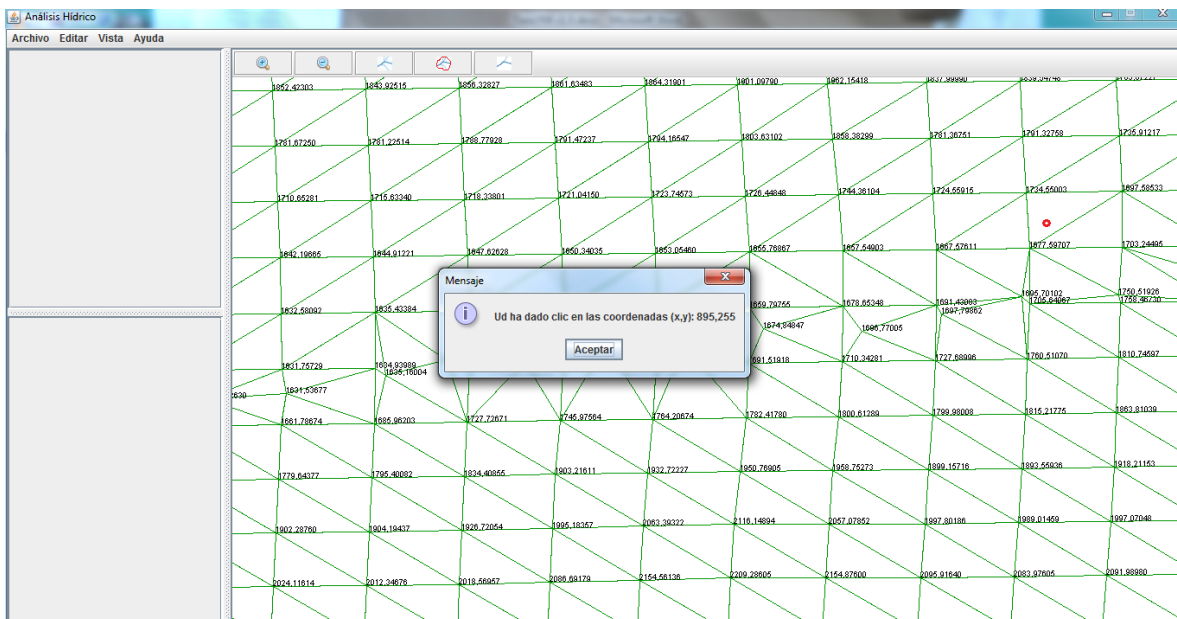


Figura 42. Dibujar río - Coordenada inicial

El río que se obtiene a partir del punto inicial indicado se visualiza en color azul. Figura 43.

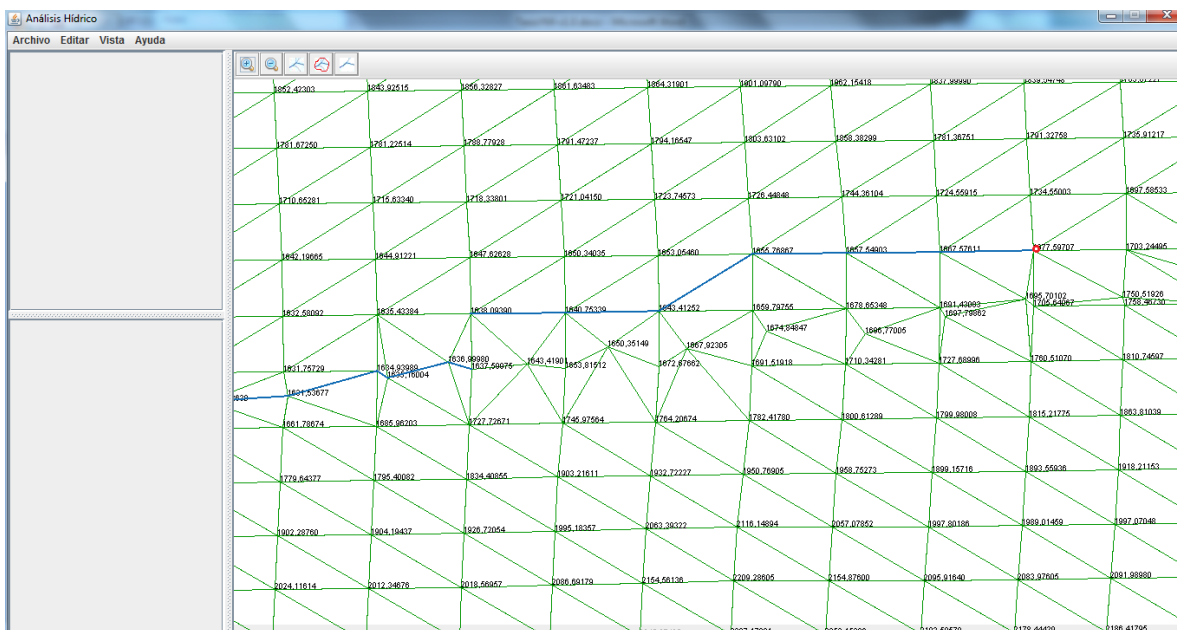


Figura 43. Río dibujado

4.1.2.5. Funcionalidades sobre el Río en el Modelo Digital del Terreno

Sobre el modelo digital del río, se pueden trabajar las siguientes funcionalidades:

1. *Aumentar área*: se debe seleccionar el área candidata con el botón derecho del ratón, el área seleccionada queda encerrada en un rectángulo de color rojo, dé clic sobre el botón aumentar (Figura 44, botón número 1).

2. *Disminuir área*: para volver a la imagen inmediatamente anterior del terreno, dé clic sobre el botón disminuir (Figura 44, botón número 2).
3. *Refinar río*: permite ajustar la ruta del río al modelo digital del terreno. (Figura 44, botón número 3).
4. *Divisoria de aguas*: aquí se representan aquellos puntos de máximo valor de altura relativa entre dos laderas adyacentes pero de exposición opuesta. (Figura 44, botón número 4)
5. *Cargar río*: permite cargar el archivo plano con la información del río. (Figura 44, botón número 5)



Figura 44. Funcionalidades sobre el río

4.1.3. Curvas de nivel o Isolíneas

Para trabajar las curvas de nivel del terreno a partir de la aplicación, el modelo digital del terreno debe estar previamente cargado (Sección 3.3), luego seleccione la opción “**Isolíneas**” del menú “**Vista**”. Si desea indicar el nivel de detalle de las curvas de nivel, en la parte inferior izquierda puede modificar los datos asociados a las curvas de nivel, debe dar clic sobre el botón **Isolíneas** para ver reflejado los nuevos valores en la imagen del lado derecho de la aplicación.

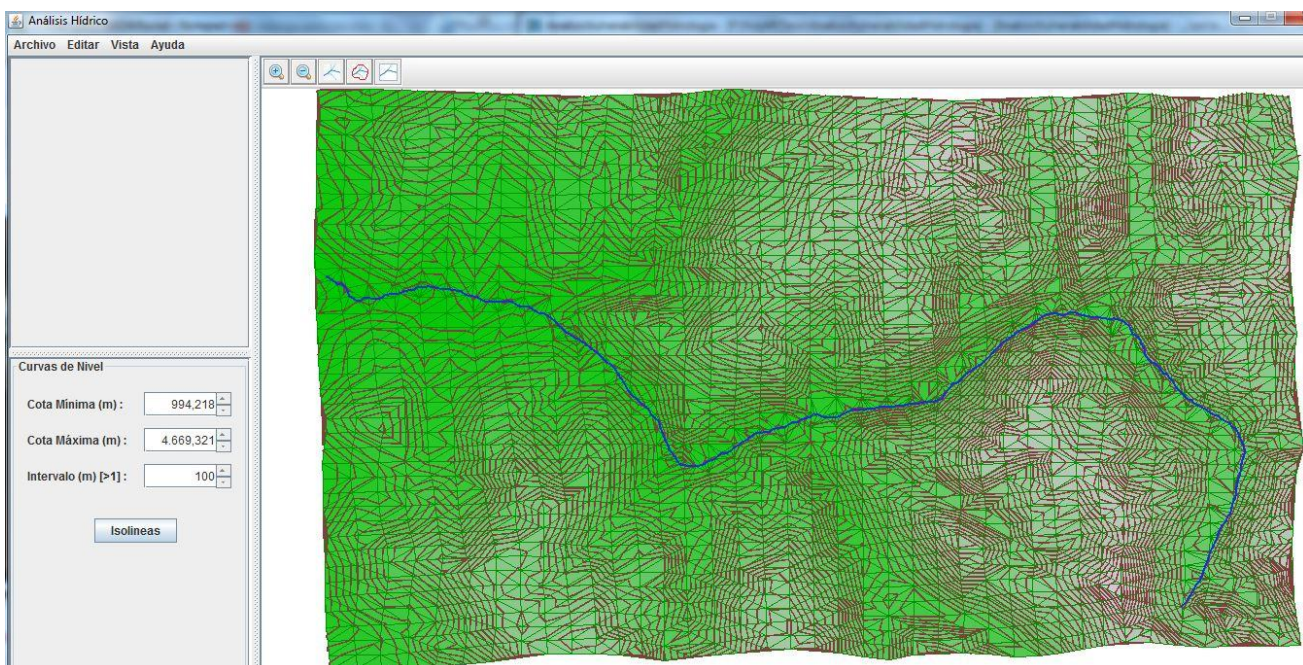


Figura 45. Curvas de nivel o isolíneas

4.1.4. Uso de Suelo

Para trabajar las unidades de respuesta hidrológica (URHs), se van a trabajar con una serie de propiedades del terreno, que proporcionan las características comunes, una de estas propiedades es el *Uso del Suelo*.

Para ingresar la información del uso del suelo, debe ir al menú "**Vista -> Uso de suelo**".

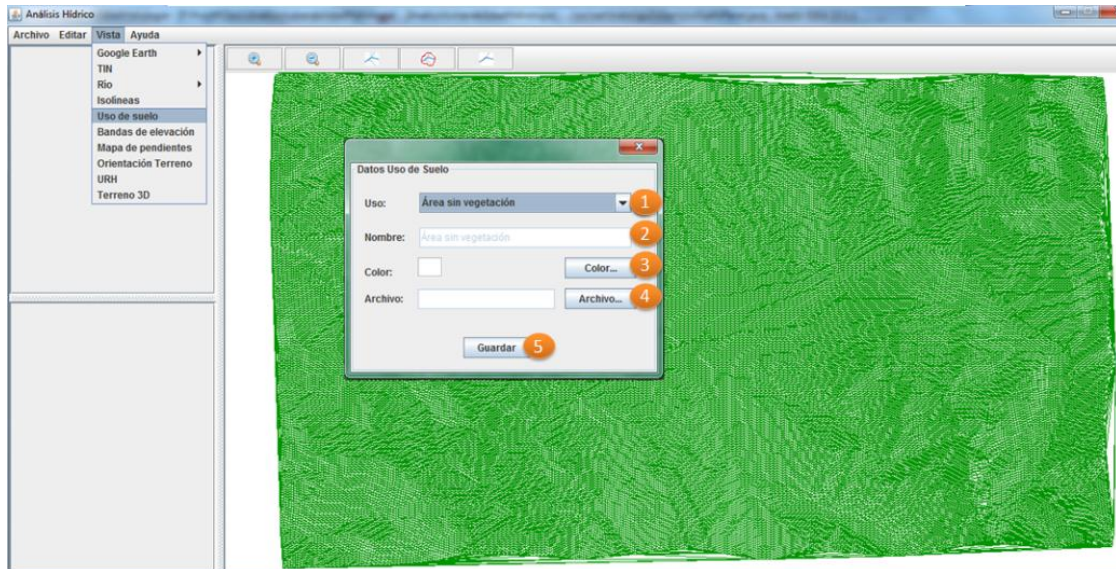


Figura 46. Vista Uso de suelo

El uso de suelo maneja los siguientes datos básicos:

1. *Uso de suelo*: la aplicación proporciona una lista de usos de suelo, si el uso del suelo no es ninguno de la lista, elija la opción "**Otro**" y proporcione un nombre. Los usos de suelo incluidos en la aplicación son:
 - ◆ Área sin vegetación.
 - ◆ Bosques.
 - ◆ Cuerpos de agua.
 - ◆ Humedales
 - ◆ Praderas y matorrales.
 - ◆ Nieves y glaciares.
 - ◆ Terrenos agrícolas.
 - ◆ Urbanas e industriales.
 - ◆ Otro.
2. *Nombre del uso de suelo*.
3. *Color*: aquí se debe elegir el color con el cual se quiere representar el uso del suelo.
4. *Archivo*: Contiene la información del uso de suelo, éste archivo es un archivo plano en formato .txt, que contiene mediante un polígono las coordenadas UTM (x,y,z) de los puntos que forman parte del uso de suelo indicado.
5. *Guardar*: este botón permite registrar el uso de suelo indicado para su posterior representación gráfica en el modelo digital del terreno.

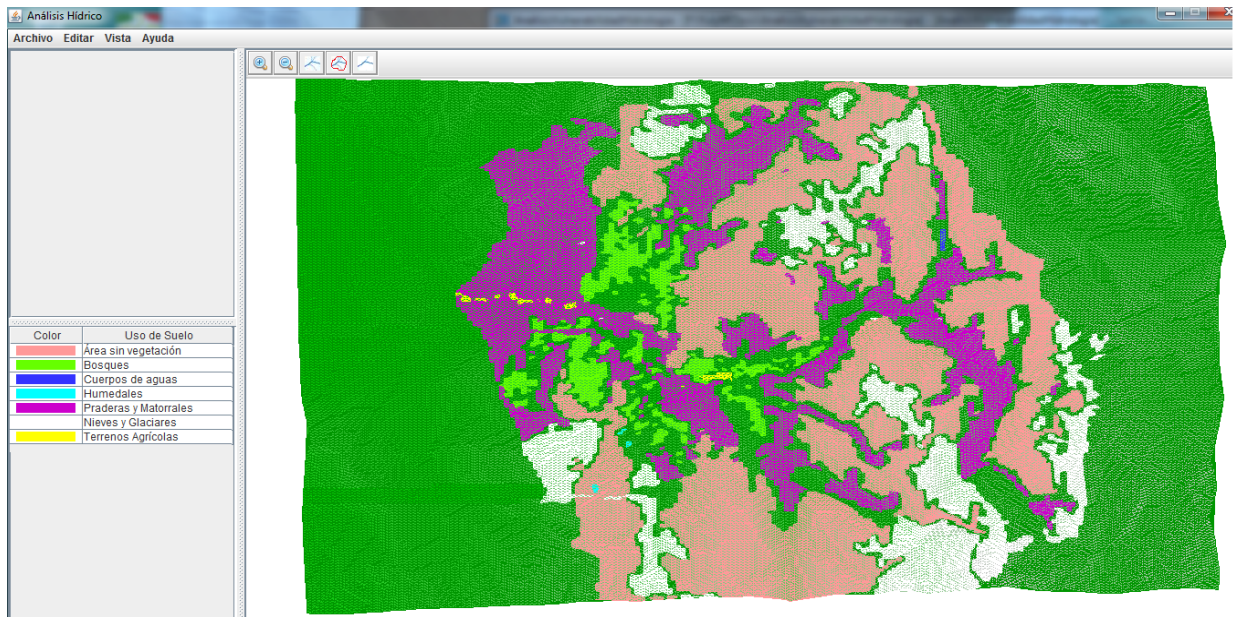


Figura 47. Uso de suelo del terreno

4.1.5. Bandas de Elevación

La vista asociada a las bandas de elevación, se calcula a partir de la altura del triángulo. Esta opción se encuentra en el menú “**Vista -> Bandas de Elevación**”.

Para visualizar las bandas de elevación se debe haber cargado previamente en la aplicación el modelo digital de terreno de la zona de estudio indicado en la sección 3.3.

La vista de las bandas de elevación por defecto calcula 7 bandas de elevación, si se quiere modificar el número de bandas a utilizar, debe dar clic sobre la caja de chequeo **Seleccionar número de bandas a utilizar**, luego indicar el número de bandas entre 3 y 7 y dar clic sobre el botón *Modificar bandas*.

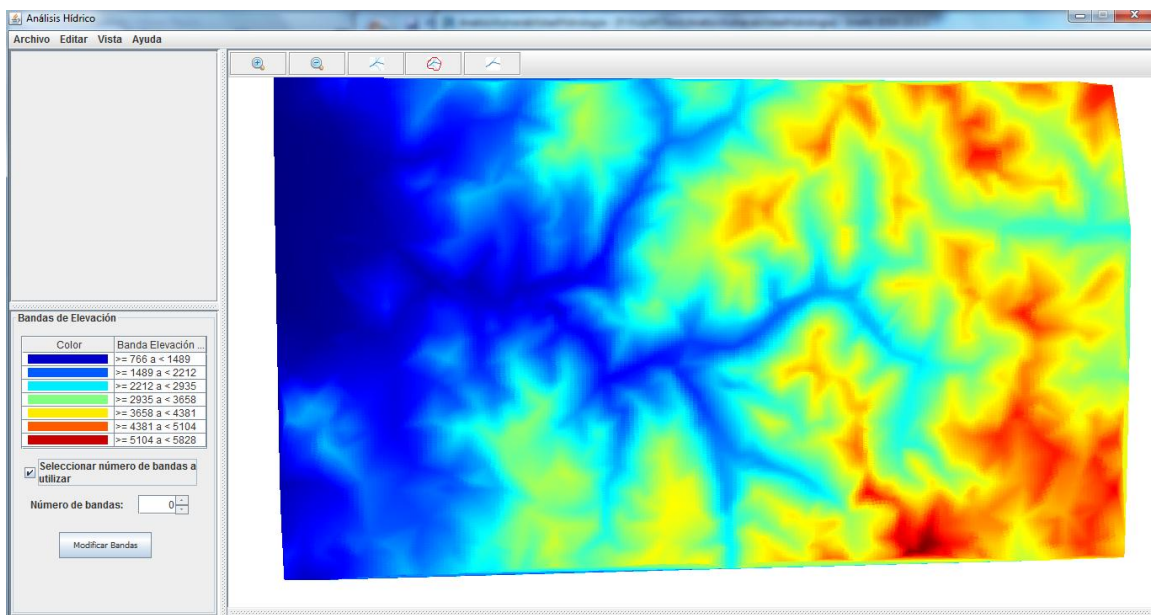


Figura 48. Vista: Bandas de elevación

4.1.6. Pendiente

La vista del mapa de pendientes, se apoya en el cálculo del máximo ángulo del triángulo, es decir, dependiendo del ángulo del triángulo se simbolizan, en tono rojo las zonas de mayor pendiente y en verde las zonas más planas.

Esta vista se encuentra en el menú “*Vista -> Mapa de Pendientes*”.

Para visualizar el mapa de pendientes se debe haber cargado previamente en la aplicación el modelo digital de terreno de la zona de estudio indicado en la sección 3.3.

La vista del mapa de pendientes por defecto trabaja con 5 clasificaciones de pendientes a saber:

Color	Clasificación	Pendiente en grados	Descripción
Verde claro	Muy baja	0° a < 10°	Pendientes naturales menores de 10°
Verde medio	Baja	10° a < 20°	Pendientes naturales comprendidas entre 10° - 20°
Verde oscuro	Media	20° a < 35°	Pendientes naturales comprendidas entre 20° - 35°
Rojo	Alta	35° a < 50°	Pendientes naturales comprendidas entre 35° - 50°
Púrpura	Muy alta	>= 50°	Pendientes naturales mayores de 50°

Tabla 2. Clasificación mapa de pendientes

Si se quiere modificar la clasificación de pendientes a utilizar, debe dar clic sobre la caja de chequeo **Seleccionar pendientes a utilizar**, luego dar clic sobre la o las pendientes a utilizar (mínimo 3 pendientes) y dar clic sobre el botón *Modificar Pendientes*.

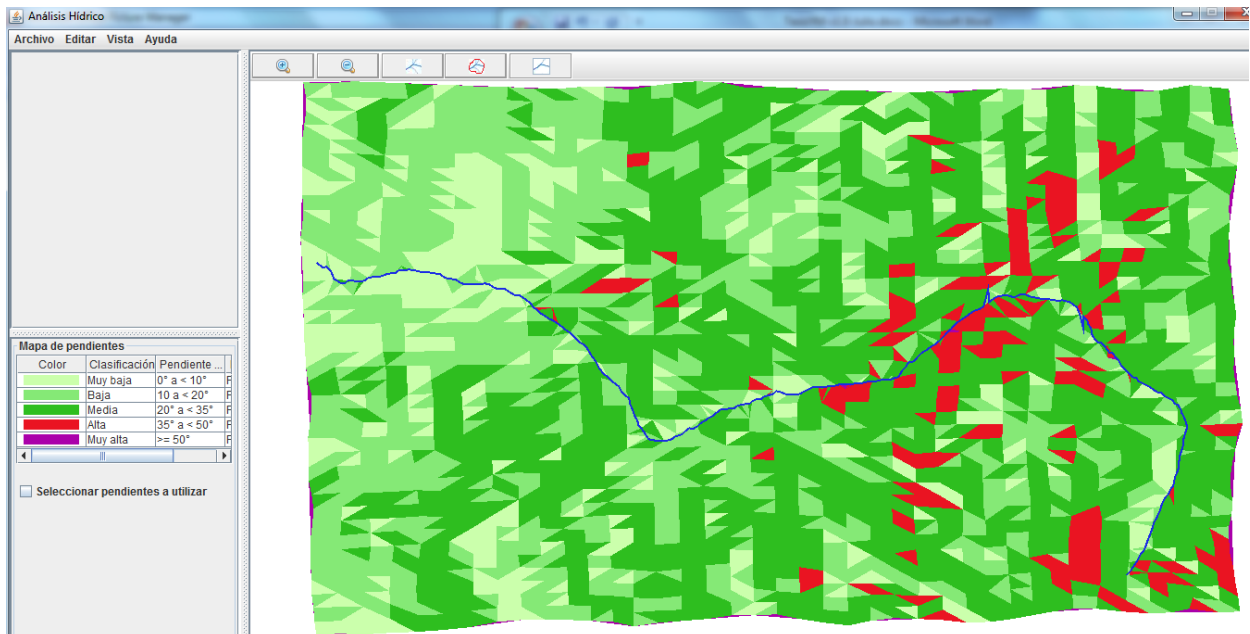


Figura 49. Mapa de pendientes

4.1.7. Orientación del terreno

La vista de orientación del terreno, nos proporciona información del terreno con respecto a la exposición al sol. Esta vista se encuentra en el menú “**Vista -> Orientación Terreno**”.

Para visualizar el mapa de orientación del terreno se debe haber cargado previamente en la aplicación el modelo digital de terreno de la zona de estudio indicado en la sección 3.3.

La vista del mapa de orientación por defecto trabaja con 8 orientaciones a saber:

Color	Azimut	Orientación
Rojo	>337.5° a 360° - 0° a <= 22.5°	Norte
Verde	> 22.5° a <= 67.5°	Noreste
Oscuro Verde	> 67.5° a <= 112.5°	Este
Grigio	> 112.5° a <= 157.5°	Sureste
Amarillo	> 157.5° a <= 202.5°	Sur
Cian	> 202.5° a <= 247.5°	Sudoeste
Rosado	> 247.5° a <= 292.5°	Oeste
Púrpura	> 292.5° a <= 337.5°	Noroeste

Tabla 3. Orientación del terreno

Si se quiere modificar las orientaciones de terreno a utilizar en la zona de estudio, debe dar clic sobre la caja de chequeo **Seleccionar orientación a utilizar**, luego dar clic sobre la o las orientaciones a utilizar (mínimo 4 orientaciones) y dar clic sobre el botón **Modificar Orientación**.

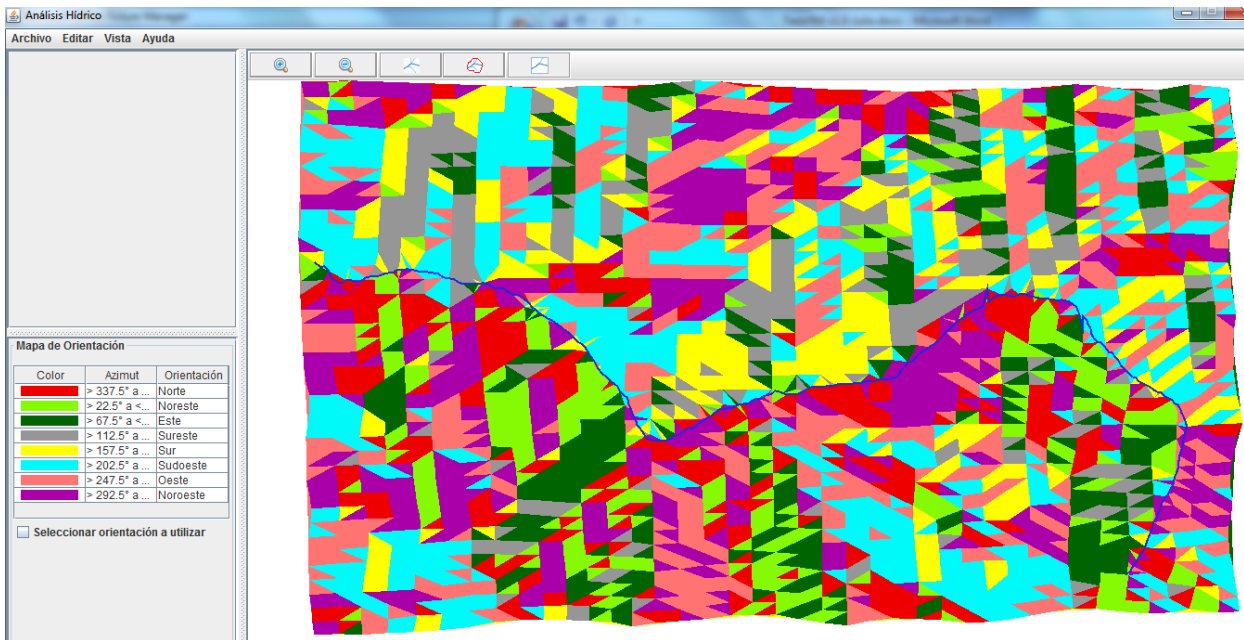


Figura 50. Orientación del terreno

4.1.8. Unidades de Respuesta Hidrológica

Esta opción se encuentra en el menú “Vista -> URH”.

Las unidades de respuesta hidrológica se pueden calcular a partir de las siguientes propiedades:

1. Bandas de elevación.
2. Uso de suelo.
3. Pendiente.
4. Orientación del terreno.

Se deben seleccionar mínimo 2 propiedades, indicando la prioridad de las propiedades según orden de selección de URHs a usar.

En la figura 51, se calculan 60 unidades de respuesta hidrológica a partir de las propiedades según orden indicado.

1. Bandas de elevación: 3 bandas de elevación a utilizar.
2. Pendiente: 4 pendientes a utilizar.
3. Orientación: 4 orientaciones a utilizar.

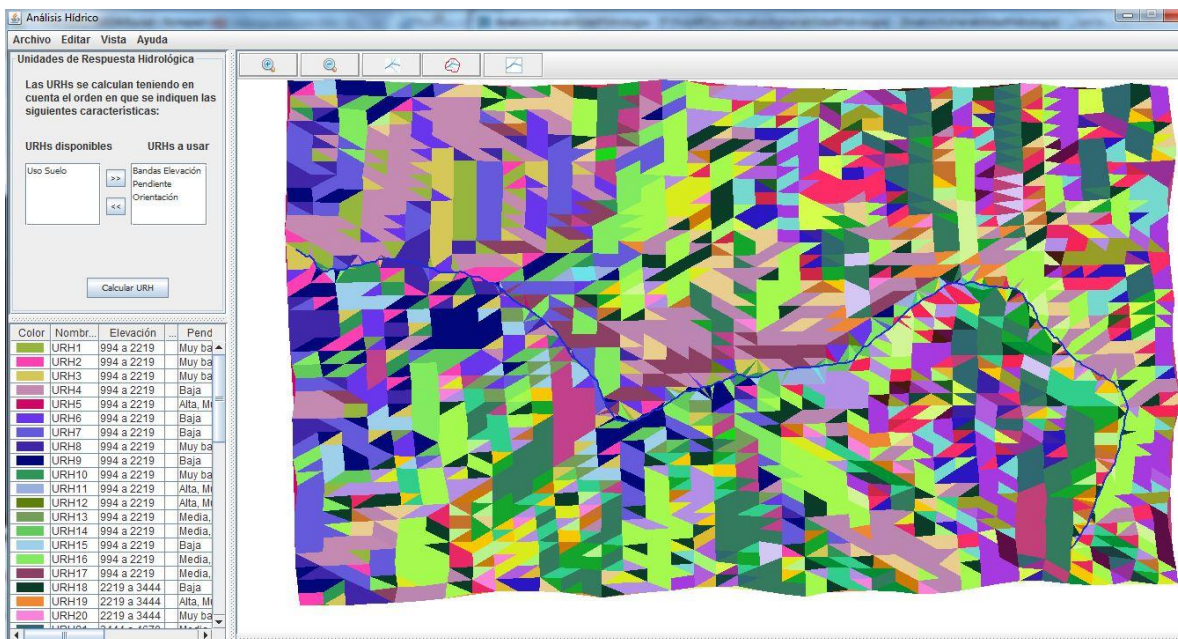


Figura 51. Unidades de Respuesta Hidrológica a partir de 3 propiedades

En la figura 52, se calculan 15 URHs a partir de 2 propiedades:

1. Orientación de terreno: 4 orientaciones a utilizar.
2. Bandas de elevación: 3 bandas de elevación a utilizar.

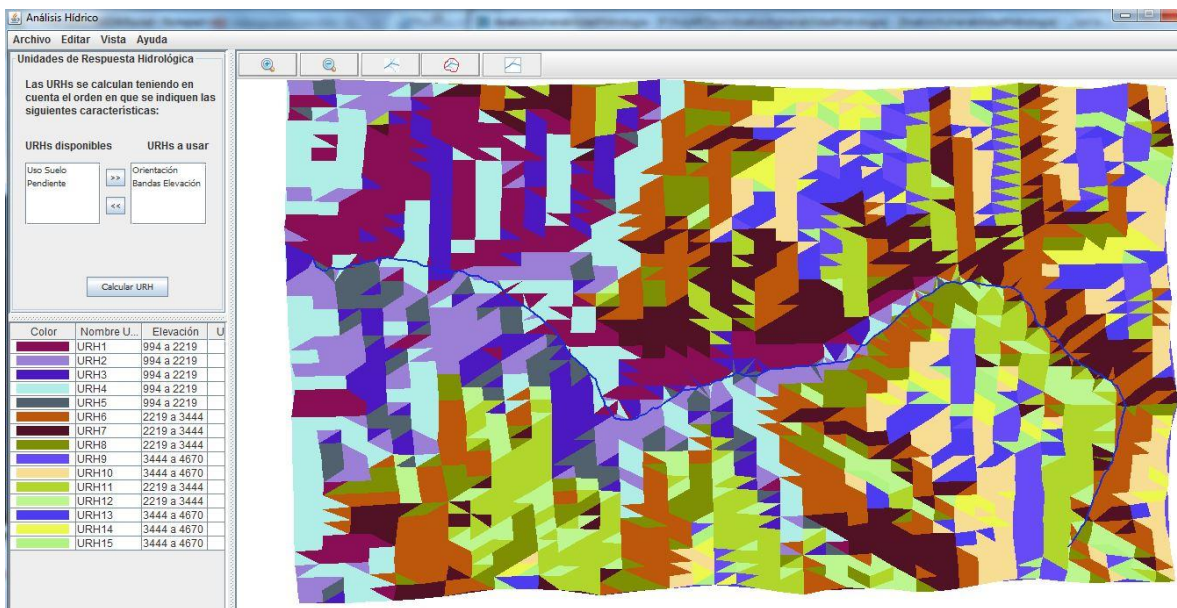


Figura 52. Unidades de Respuesta Hidrológica a partir de 2 propiedades

Cuando no se utiliza la propiedad, en la tabla de resultados la columna asociada a la propiedad queda en blanco.

Si al momento de calcular las URHs, la información asociada a la propiedad no ha sido calculada previamente, la aplicación indica el mensaje **“Las características para las URHs seleccionadas están vacías”**

Además, si no se seleccionan mínimo 2 propiedades al momento de calcular las URHs, la aplicación indica el mensaje **“No se han seleccionado características para calcular las URHs ó solo hay una”**.

4.1.9. Divisoria de Aguas

Para dibujar la divisoria de aguas se debe estar en la vista de la TIN y dar clic en el punto para el punto inicial sobre el cual se quiere calcular la divisoria de aguas, la aplicación a través de un mensaje indica las coordenadas a nivel de pantalla sobre las que se dio clic.

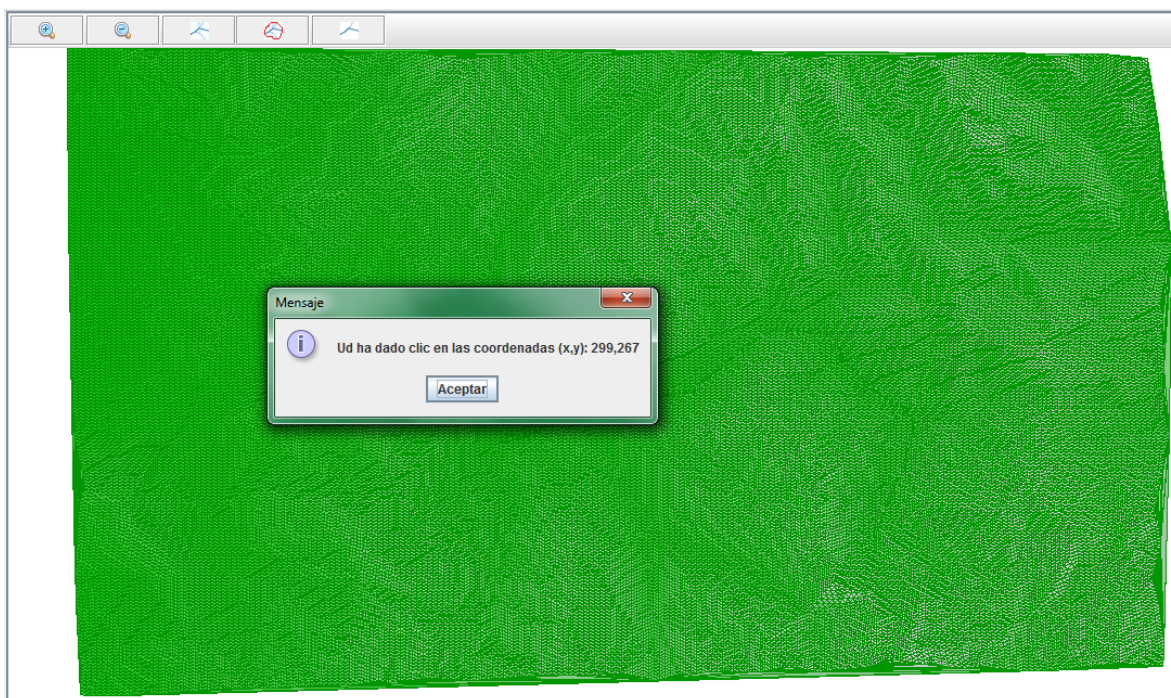


Figura 53. Punto inicial para la divisoria de aguas

Una vez definidas las coordenadas, dar clic sobre el botón divisoria de aguas como se muestra en la figura de abajo.

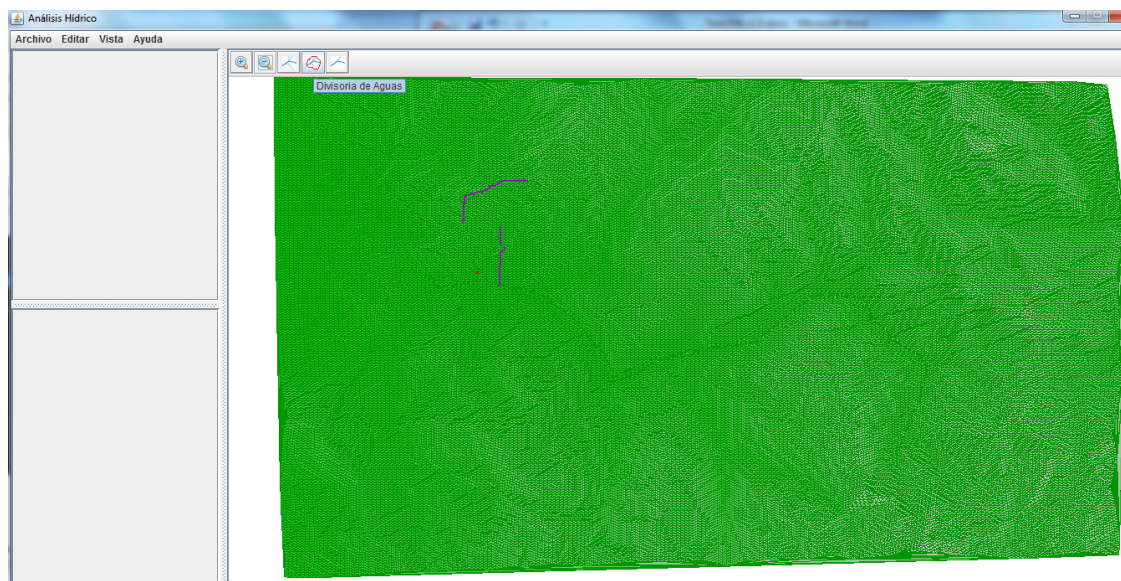


Figura 54. Divisoria de aguas

El punto en coordenadas UTM sobre el cual se dio clic es:

363437.57244258246, 6364386.160213712, con una altura de 1158.149 metros.

Al ubicar el punto del clic en Google Earth

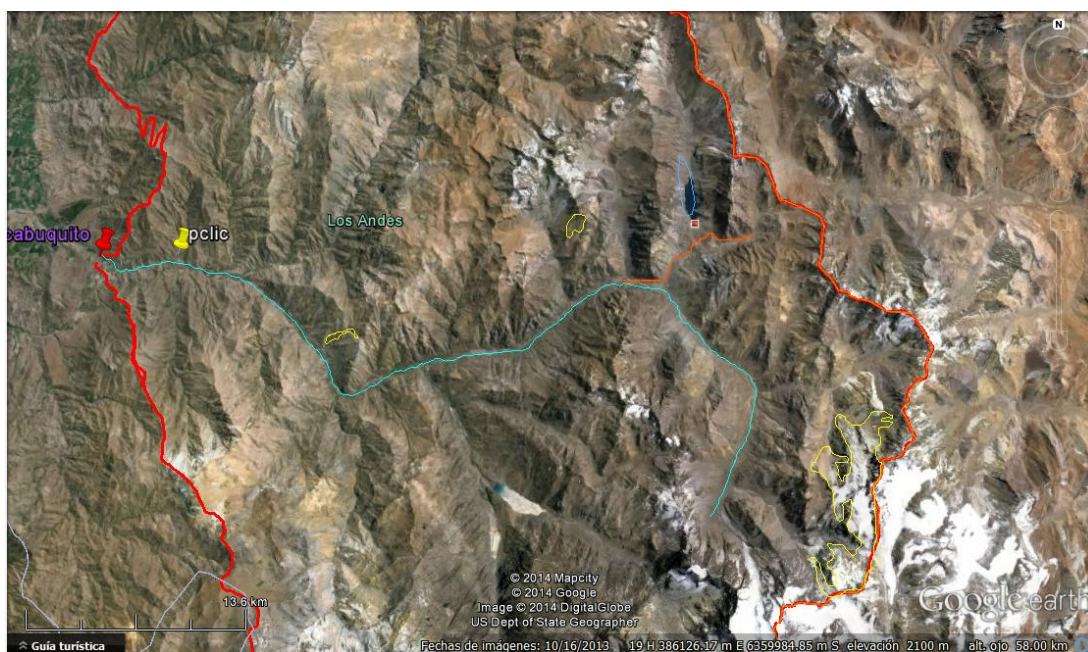


Figura 55. Punto clic de divisoria de aguas en GE

Al comparar visualmente la divisoria de aguas del software desarrollado con la zona de GE, se puede apreciar que la divisoria de aguas no es completa, es decir, no se encierra una cuenca, esto se debe a la nube de puntos utilizada en la aplicación.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS OBTENIDOS

En este capítulo se presenta la validación de la representación de la cuenca obtenida mediante el software construido versus otros sistemas geográficos como Google Earth y Topo3.

5.1. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio a analizar es la cuenca de Aconcagua en Chacabucuito, considerando subcuencas del río Blanco, Colorado y Juncal.

La zona de estudio se trabaja en el software desarrollado y se ubicada en el Google Earth embebido dentro de la aplicación para obtener mediante éste 2 escenarios para el MDT:

1. Un MDT con 10000 puntos.

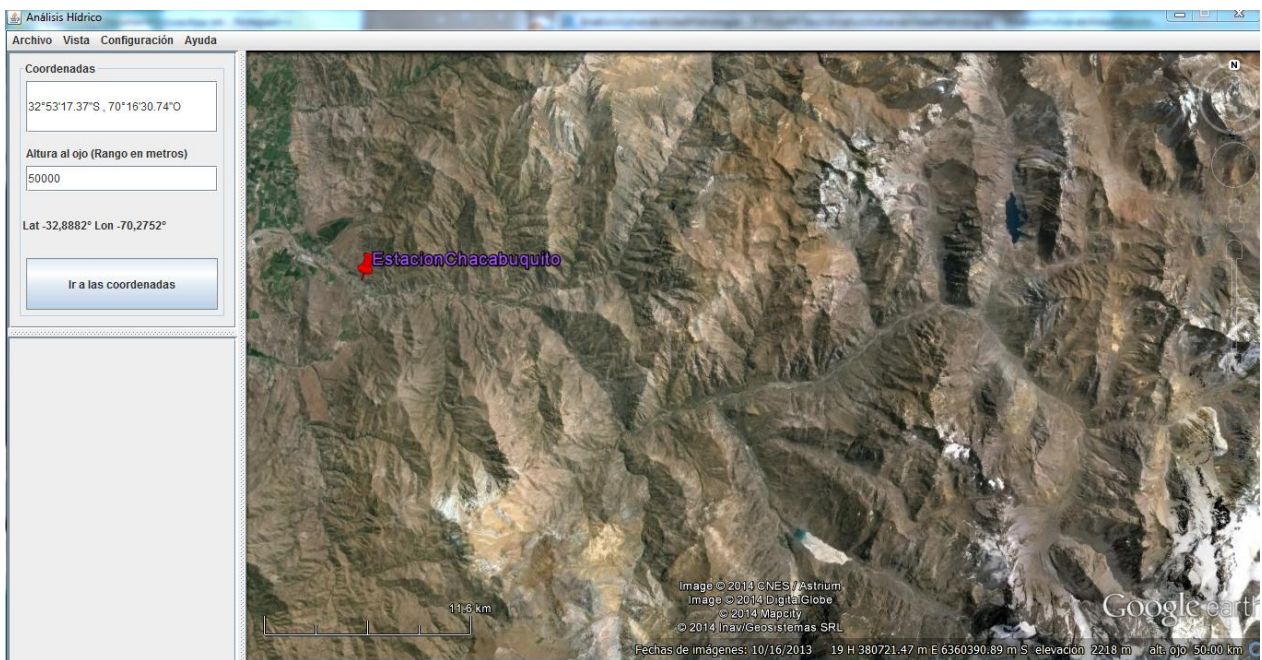


Figura 56. Zona de estudio para el MDT con 10000 puntos

2. Un MDT con 25 puntos: para obtener esta nube de puntos se va a ampliar un pedazo de la zona de estudio, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 57. Ubicación Zona de Estudio a una altura al ojo de 41.84Km

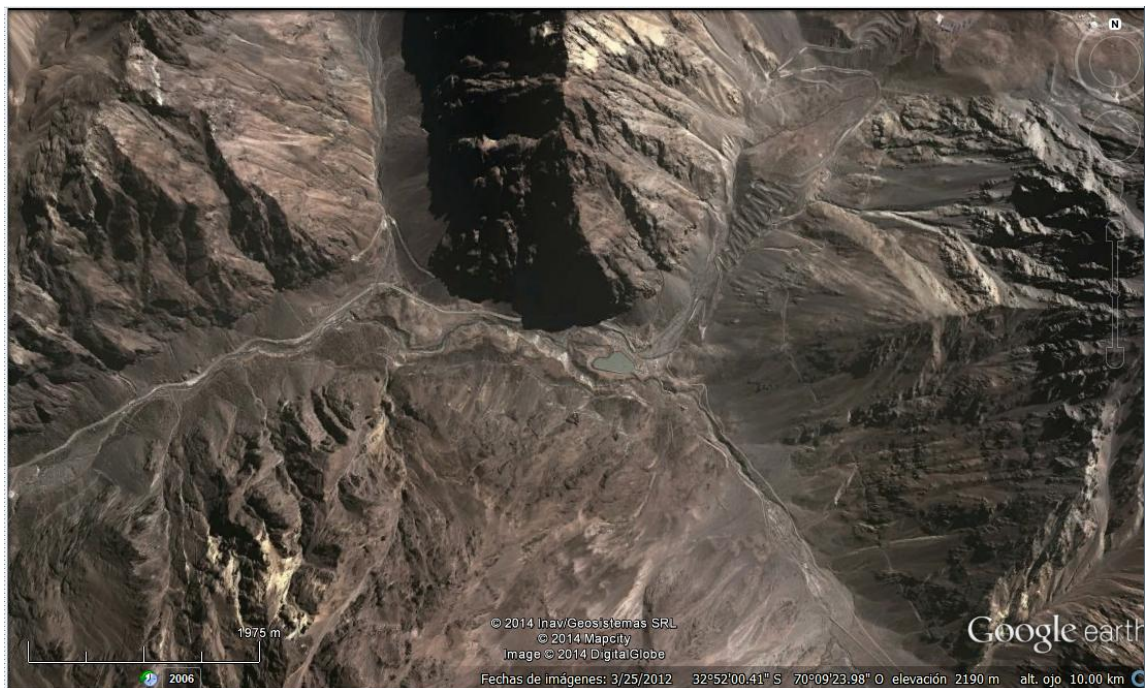


Figura 58. Ampliación de Zona de estudio para validación de resultados

A partir de estos dos modelos digitales de terreno se va a realizar la validación de los resultados mediante la comparación de la representación gráfica del software desarrollado versus Topo3.

5.2. MODELO DIGITAL DEL TERRENO DE LA ZONA DE ESTUDIO

5.2.1. Escenario 1: Modelo digital del terreno con 10000 puntos

Se carga el archivo del modelo digital del terreno con una nube de 10000 puntos en el software desarrollado y en Topo3, obteniendo gráficamente la siguiente Red Irregular de Triángulos.

Software desarrollado

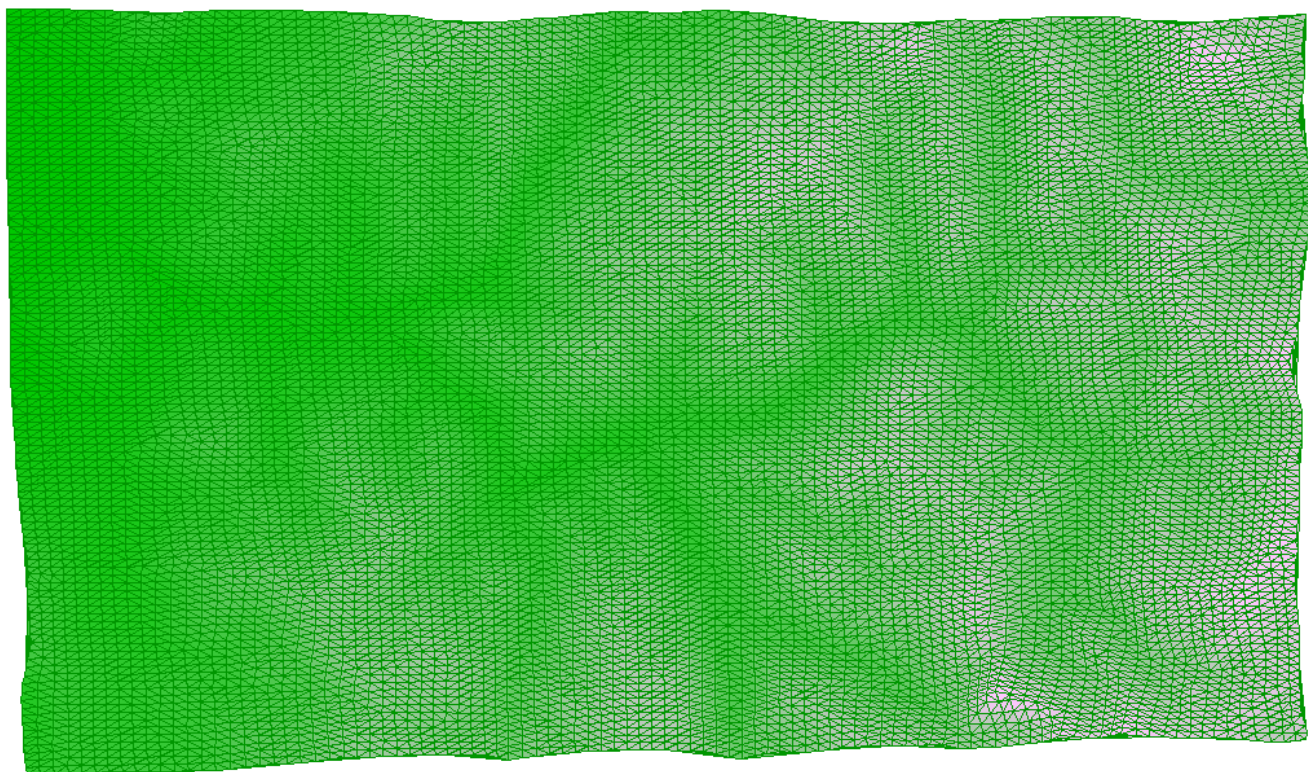


Figura 59. Red Irregular de Triángulos en el software desarrollado

Topo3

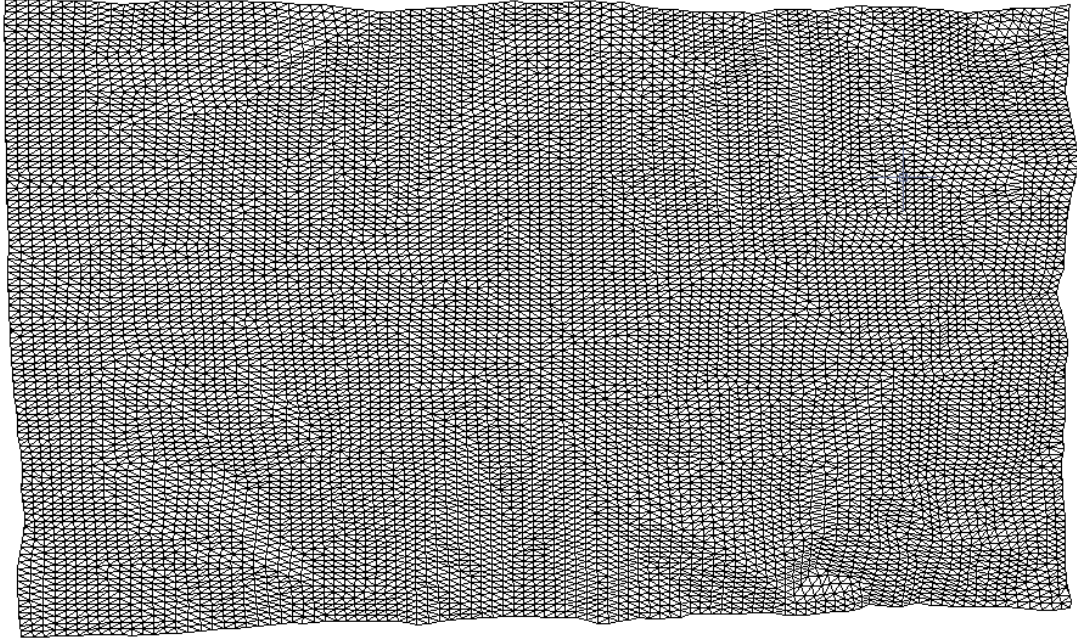


Figura 60. Red Irregular de Triángulos en Topo3

La vista gráfica del modelo digital del terreno en el software construido y en el software Topo3 presenta una Red Irregular de Triángulos igual en ambos software.

5.2.1.1. Curvas de Nivel

Para validar las curvas de nivel se crean 3 escenarios a partir de la equidistancia de las alturas de los triángulos del MDT.

Escenario 1: Curvas de Nivel a 90 metros

Software desarrollado

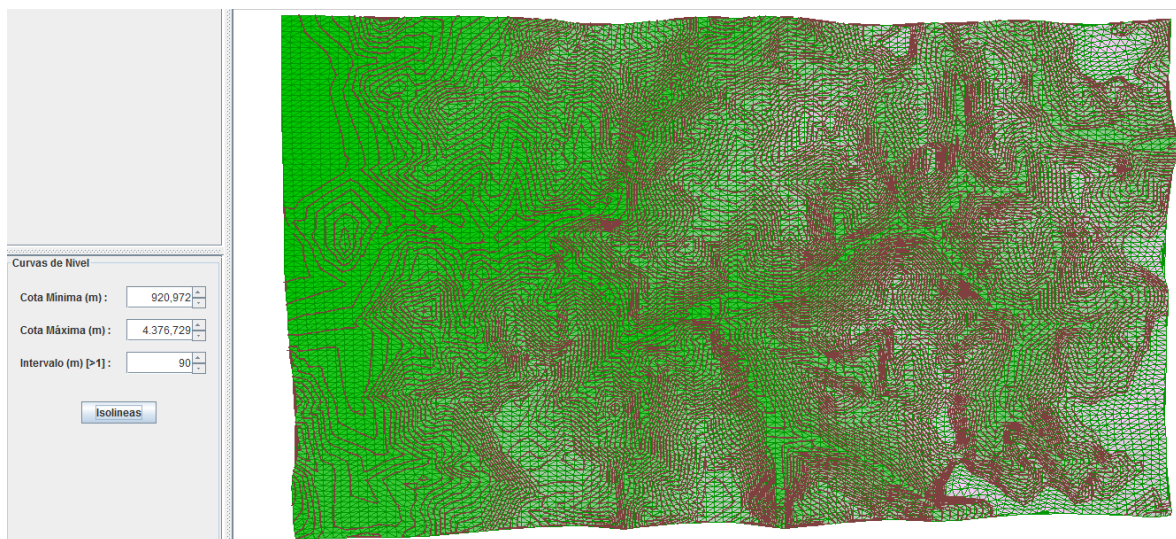


Figura 61. Curvas de nivel a 90 metros en el software desarrollado

Topo3

En Topo3 antes de crear las curvas de nivel se puede configurar parámetros asociados o dejar los valores por defecto, para este caso se modifico el parámetro Intervalo a 90.

TRIANGULAR E INTERPOLAR CURVAS DE NIVEL

Crear Triangulación (TIN) Interpolación Curvas de Nivel

PARÁMETROS

Longitud Mínima entre Puntos (m) [<10]: 0.1

Longitud Máxima del Lado del Triangulo (m) [>5.0]: 800

Quitar Triangulos Internos

Curvas de Nivel

Cota Mínima (m): 820 Intervalo (m) [>0.1]: 90

Cota Máxima (m): 5326 Numera cada (m): 250

Distancia entre Números (m): 8000

Longitud Mínima Segmento Curva de Nivel: 8

Segmentos de Quebre

Segmentos de Quebre

Longitud Máxima (m): 800

Ajusta Coordenadas

Distancia Máxima para Ajuste (m): 0.01

Curvas de Nivel Importadas

Ajuste Modelo Digital de Terreno a Triangulos Mal Condicionados

Parábola Cúbica de Bezier

Factor de Curvatura [>=3]: 4

Número de Puntos Curva [>=5]: 10

Triangular e Interpolación Curvas de Nivel

Salir

Figura 62. Configuración Curvas de Nivel a 90 metros en Topo3

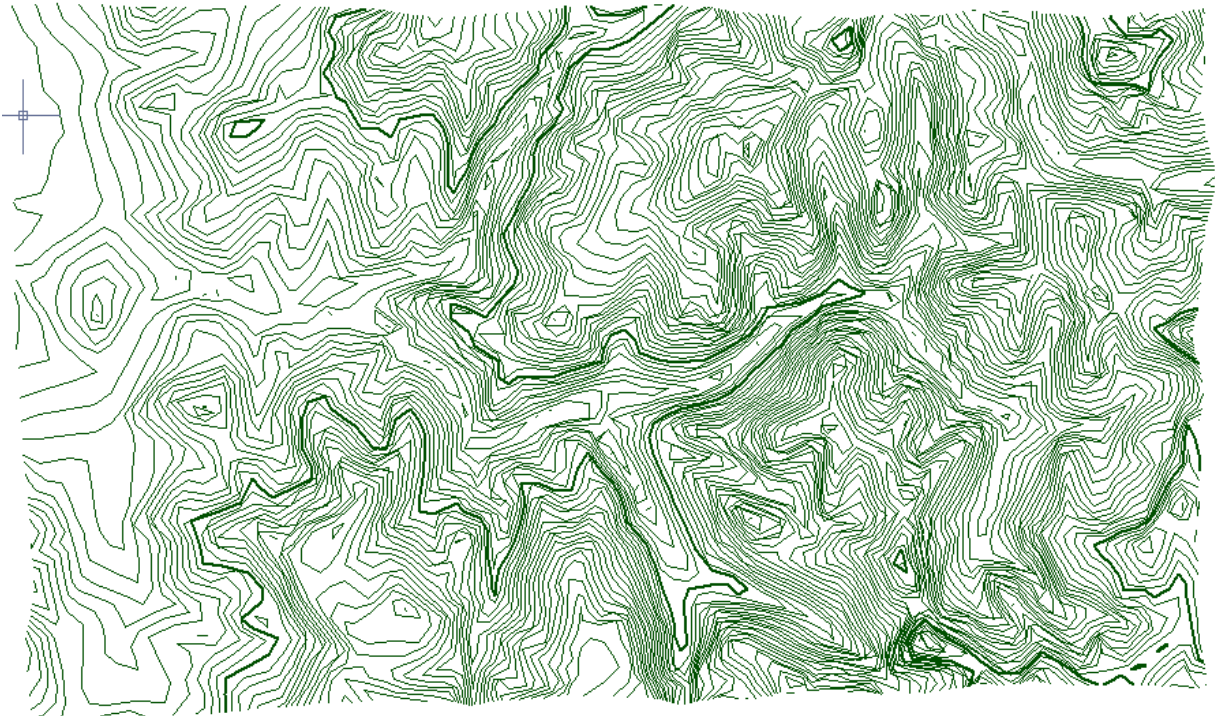


Figura 63. Curvas de nivel a 90 metros en Topo3

Escenario 2: Curvas de Nivel a 150 metros

Software desarrollado

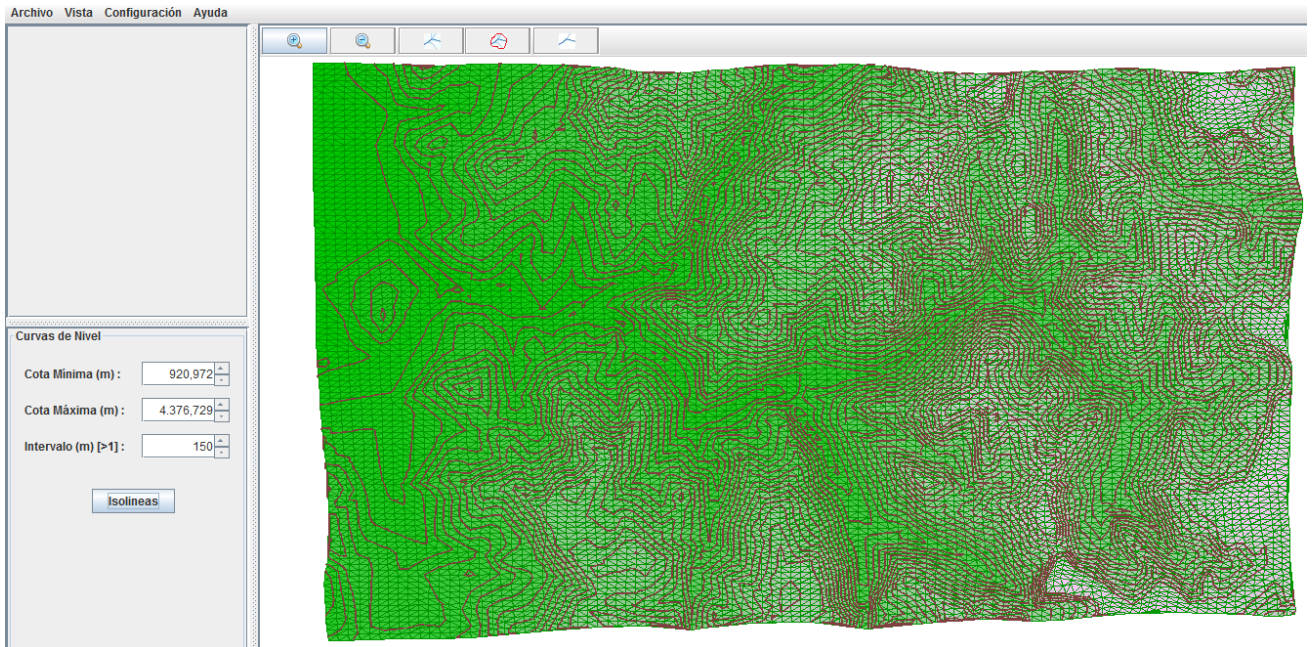


Figura 64. Curvas de nivel a 150 metros en el software desarrollado

Topo3

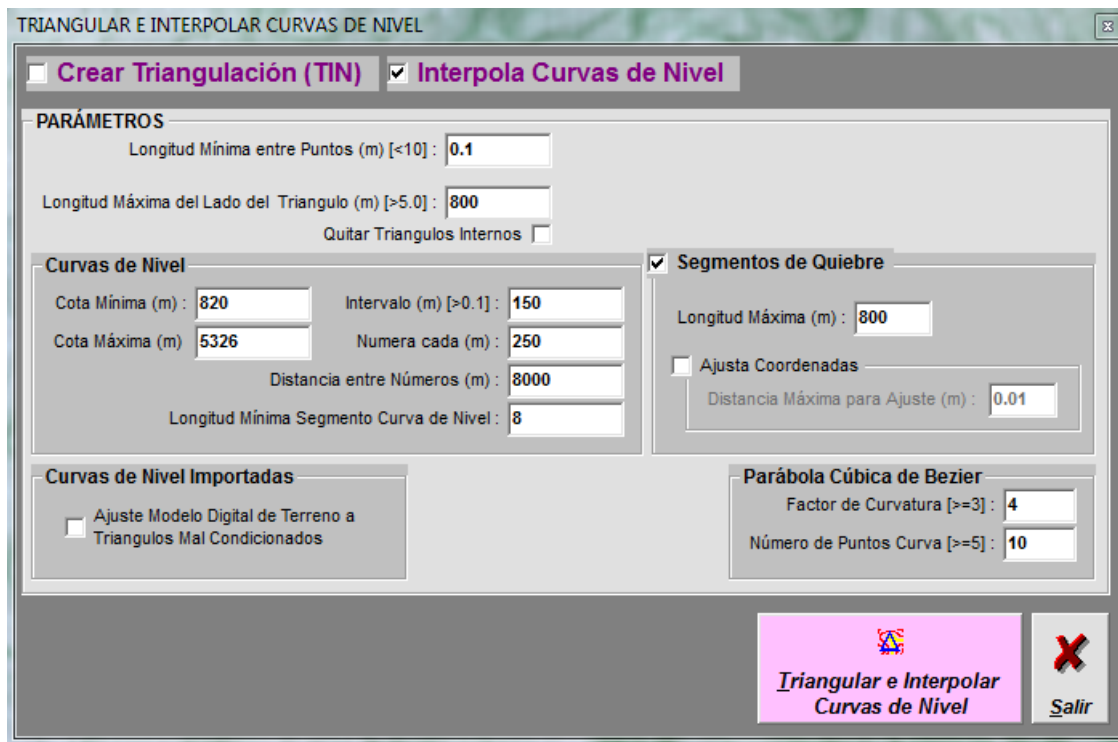


Figura 65. Configuración Curvas de Nivel a 150 metros en Topo3

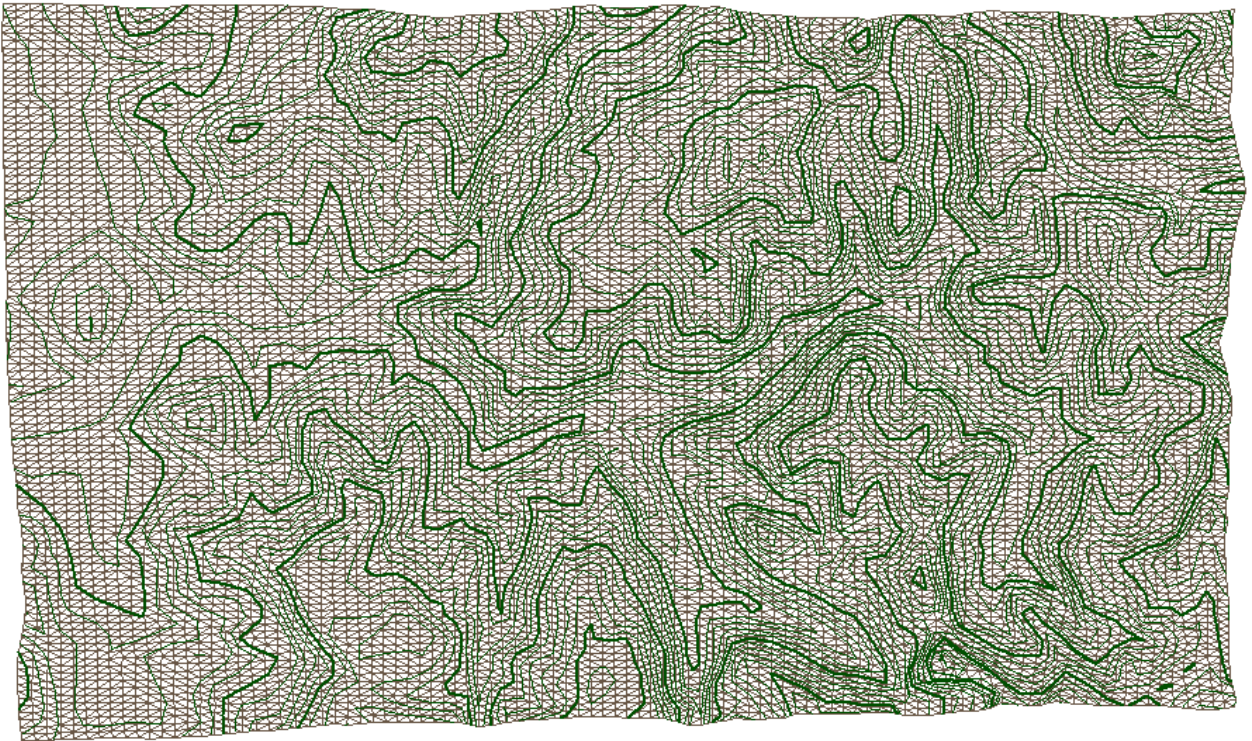


Figura 66. Curvas de nivel a 150 metros en Topo3

Escenario 3: Curvas de Nivel a 180 metros

Software desarrollado

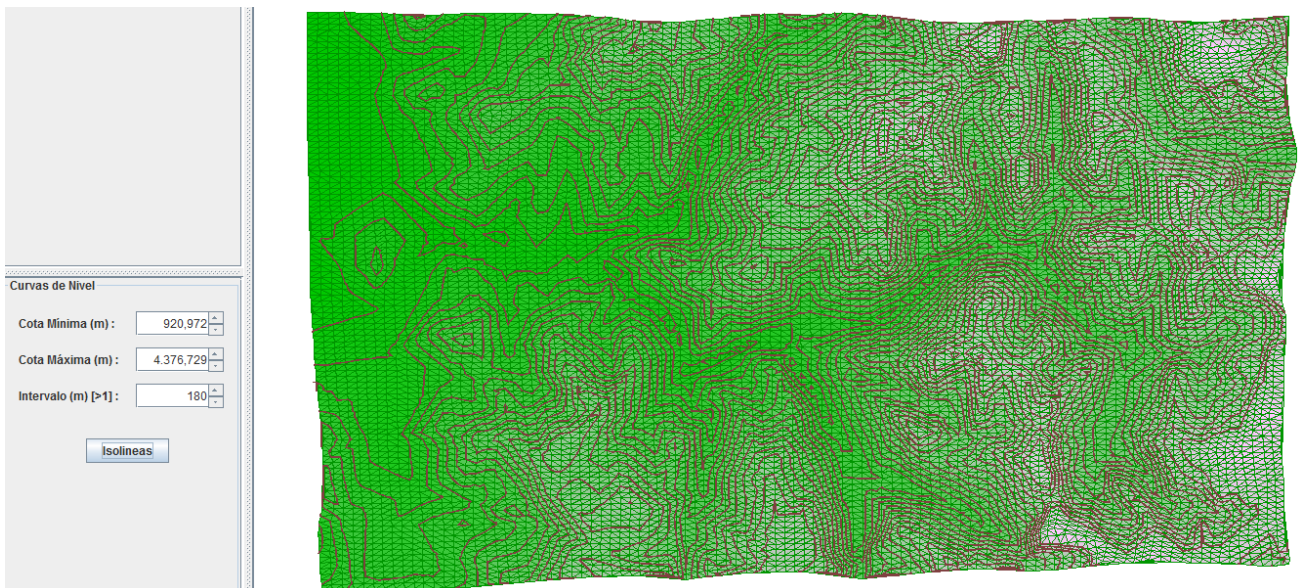


Figura 67. Curvas de nivel a 180 metros en el software desarrollado

Topo3

TRIANGULAR E INTERPOLAR CURVAS DE NIVEL

Crear Triangulación (TIN) Interpolo Curvas de Nivel

PARÁMETROS

Longitud Mínima entre Puntos (m) [<10]:

Longitud Máxima del Lado del Triangulo (m) [>5.0]:

Quitar Triangulos Internos

Curvas de Nivel

Cota Mínima (m): Intervalo (m) [>0.1]:

Cota Máxima (m): Numera cada (m):

Distancia entre Números (m):

Longitud Mínima Segmento Curva de Nivel:

Segmentos de Quiebre

Longitud Máxima (m):

Ajusta Coordenadas

Distancia Máxima para Ajuste (m):


Curvas de Nivel Importadas

Ajuste Modelo Digital de Terreno a Triangulos Mal Condicionados

Parábola Cúbica de Bezier

Factor de Curvatura [≥ 3]:

Número de Puntos Curva [≥ 5]:

 **Triangular e Interpolo Curvas de Nivel**


 **Salir**

Figura 68. Configuración curvas de nivel a 180 metros en Topo3

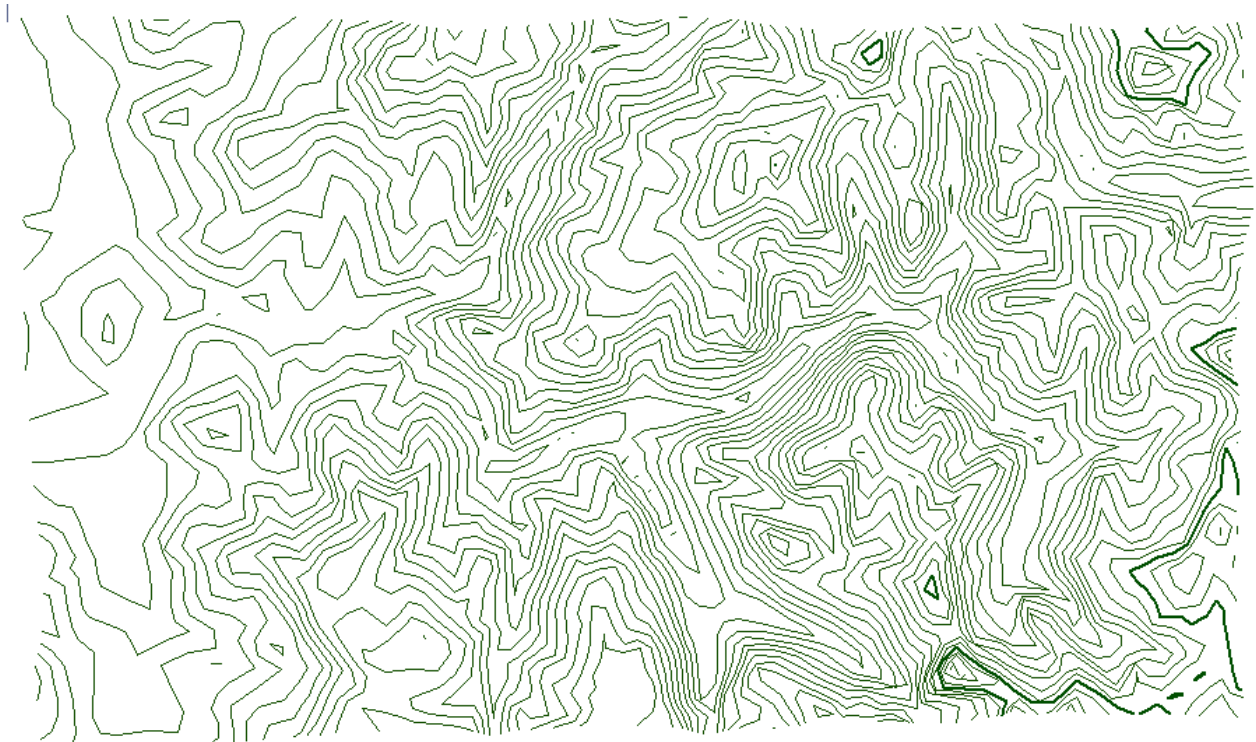


Figura 69. Curvas de nivel a 180 metros en Topo3

En los escenarios anteriormente analizados, se puede observar que las curvas de nivel en los dos software tienen la misma trayectoria a través de la Red Irregular de Triángulos.

5.2.1.2. Bandas de Elevación

Software desarrollado

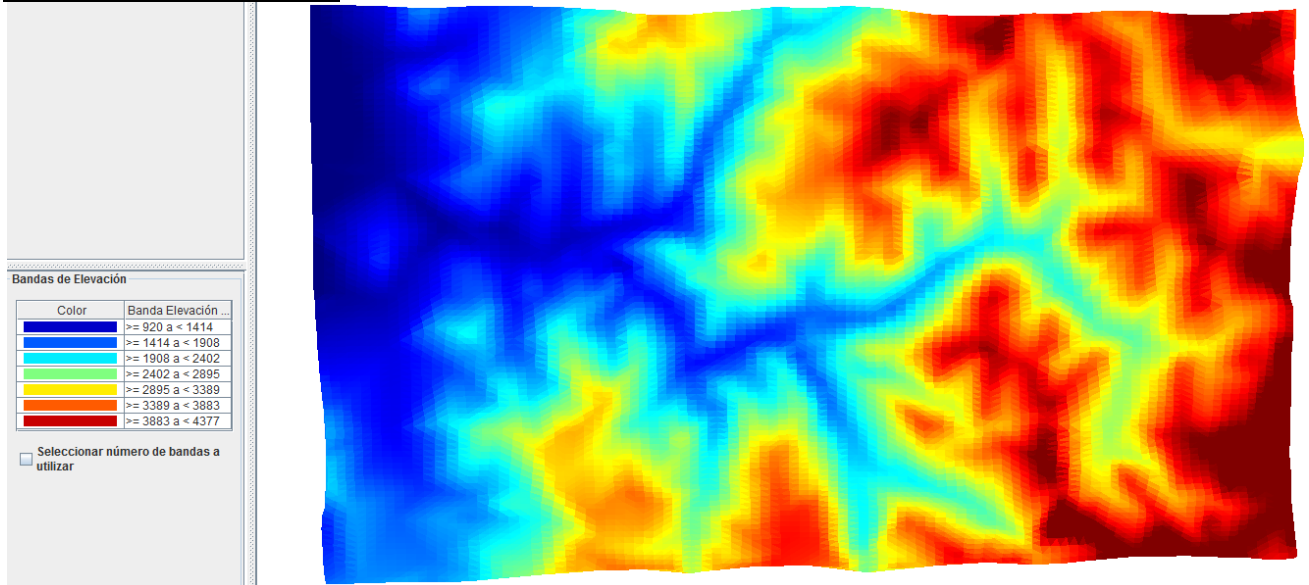


Figura 70. Bandas de elevación en el software desarrollado

Topo3

En Topo3, el manejo de colores se interpreta de la siguiente manera: colores claros para las alturas más bajas y colores más oscuros para las alturas más altas, en el caso de existir áreas asociadas a nieves, estas se representan con el color blanco.

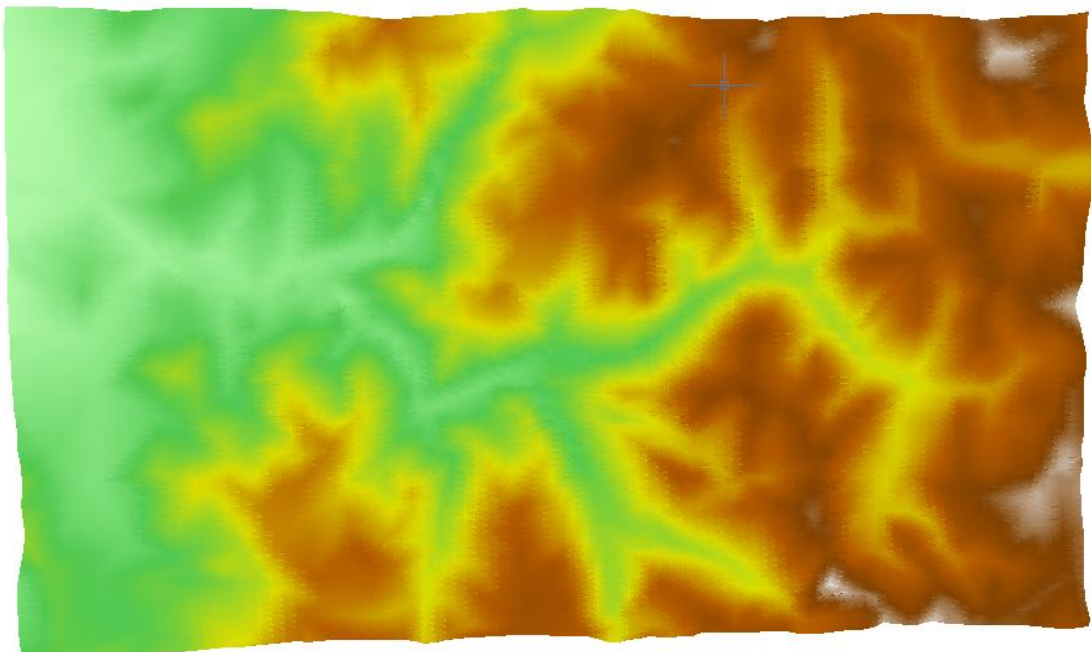


Figura 71. Bandas de Elevación en Topo3

5.2.1.3. Mapa de Pendientes

Software desarrollado

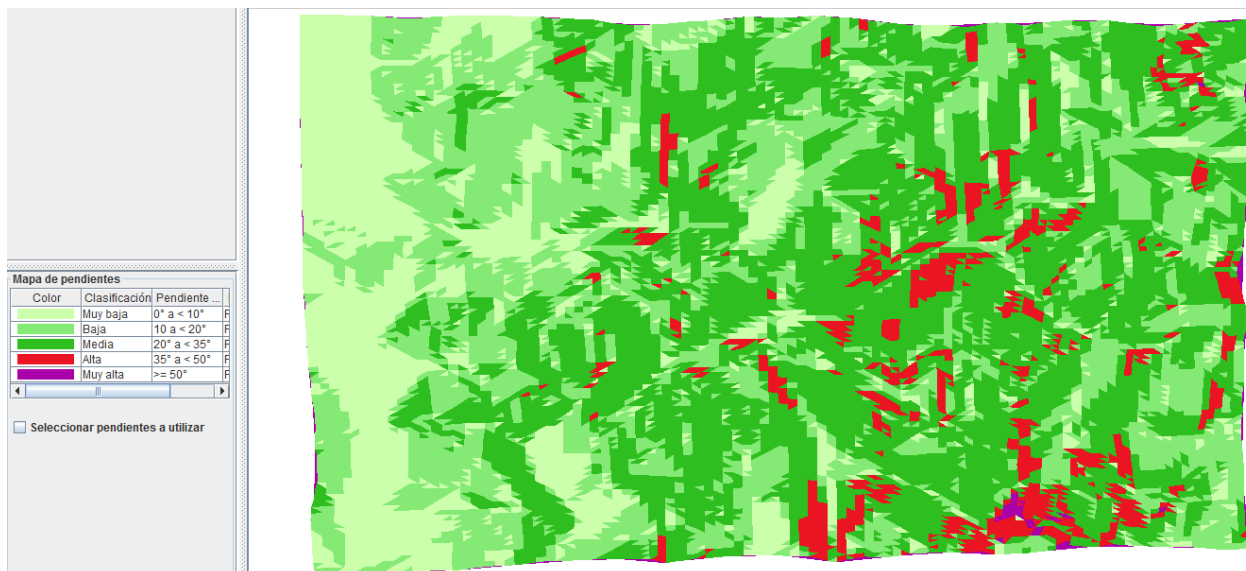


Figura 72. Mapa de pendientes en el software desarrollado

Topo3

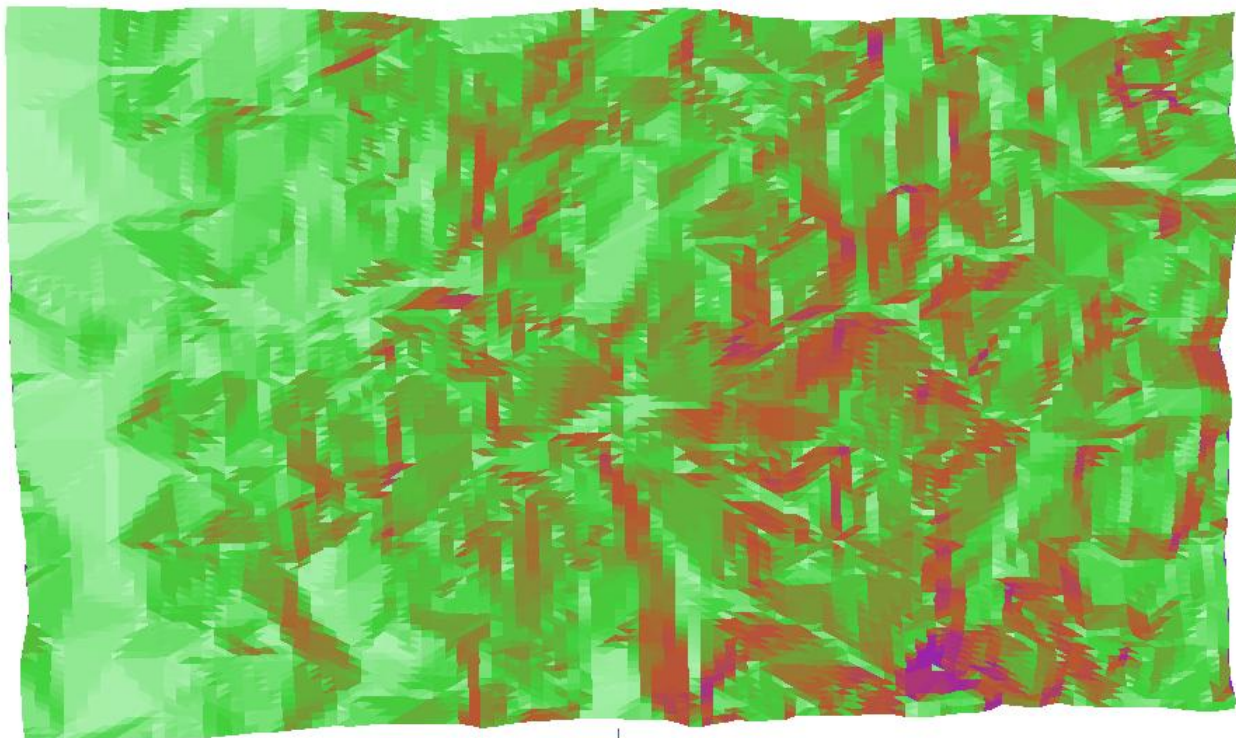


Figura 73. Mapa de pendientes en Topo3

El mapa de pendientes en el software desarrollado como en Topo3, representan en colores claros las zonas con pendientes bajas, en colores intermedios las zonas con pendientes intermedias y en colores oscuros las zonas con pendientes altas.

5.2.1.4. Orientación del Terreno

Software desarrollado

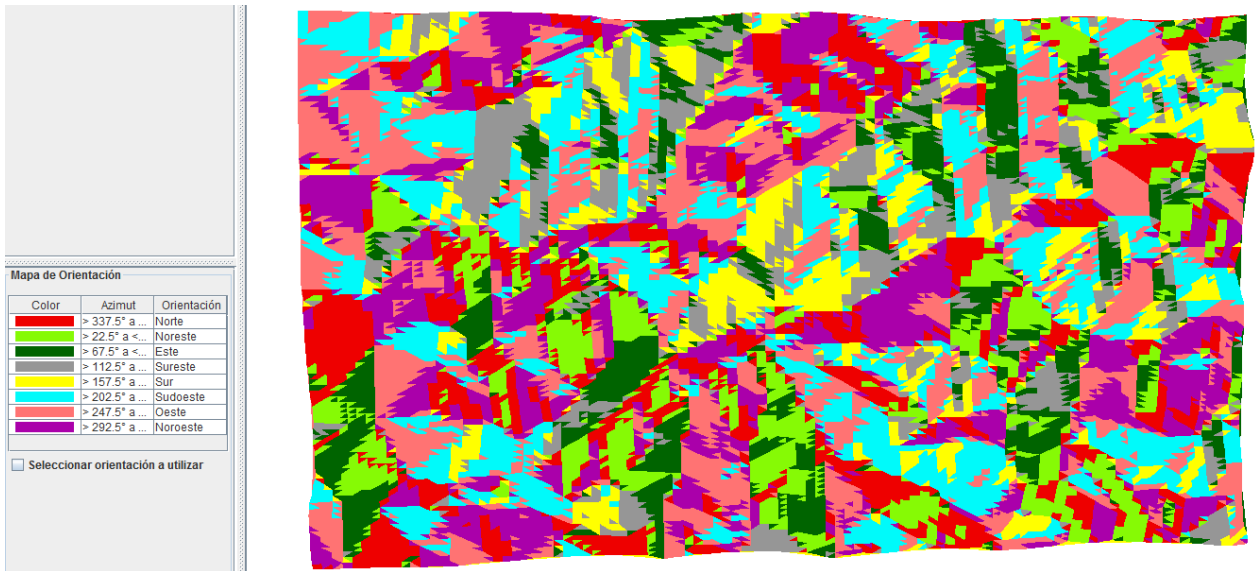


Figura 74. Orientación del terreno en el software desarrollado

Topo3

Topo3 gráfica la orientación del terreno mediante flechas, se utiliza la rosa de los vientos para interpretar las flechas y conocer la orientación del terreno.

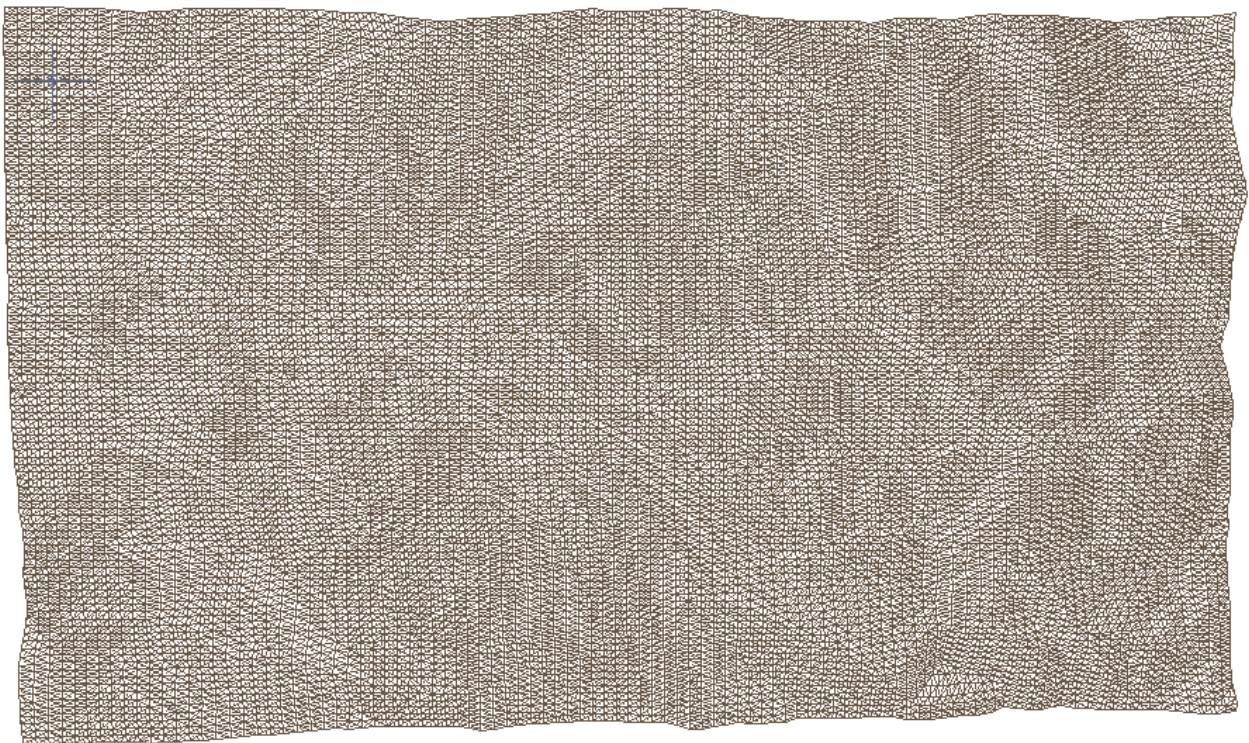


Figura 75. Orientación del terreno en Topo3

5.2.2. Escenario 2: Modelo digital del terreno con 25 puntos

Se carga el archivo del modelo digital del terreno con una nube de 25 puntos en el software desarrollado y en Topo3, obteniendo gráficamente la siguiente Red Irregular de Triángulos.

Software desarrollado

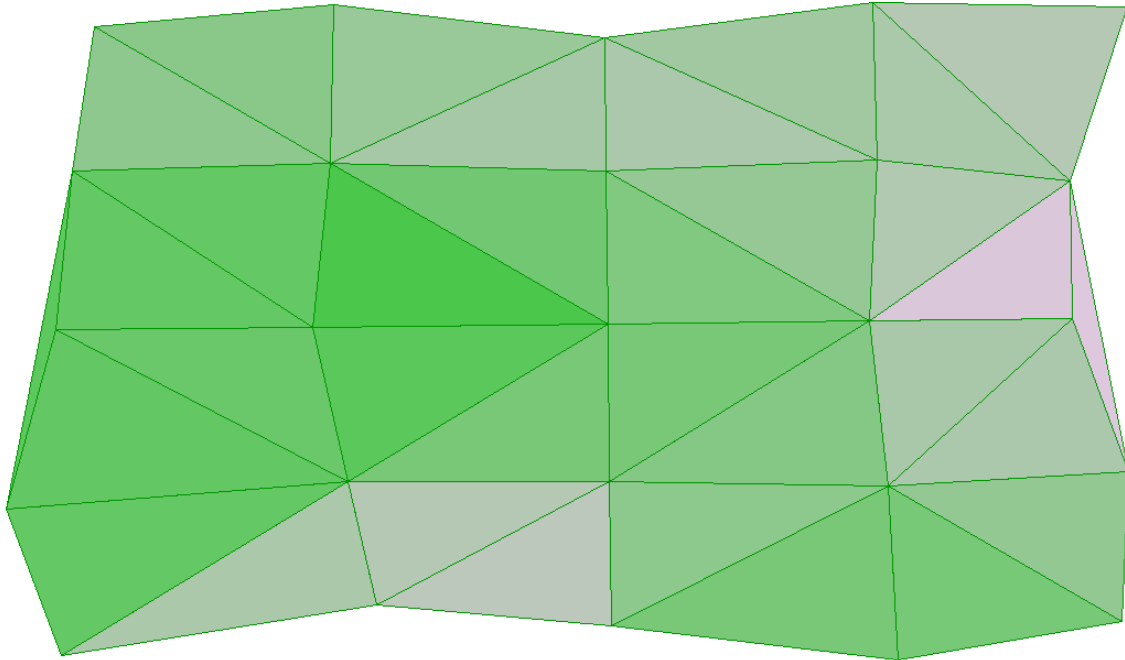


Figura 76. Red Irregular de Triángulos en el software desarrollado

Topo3

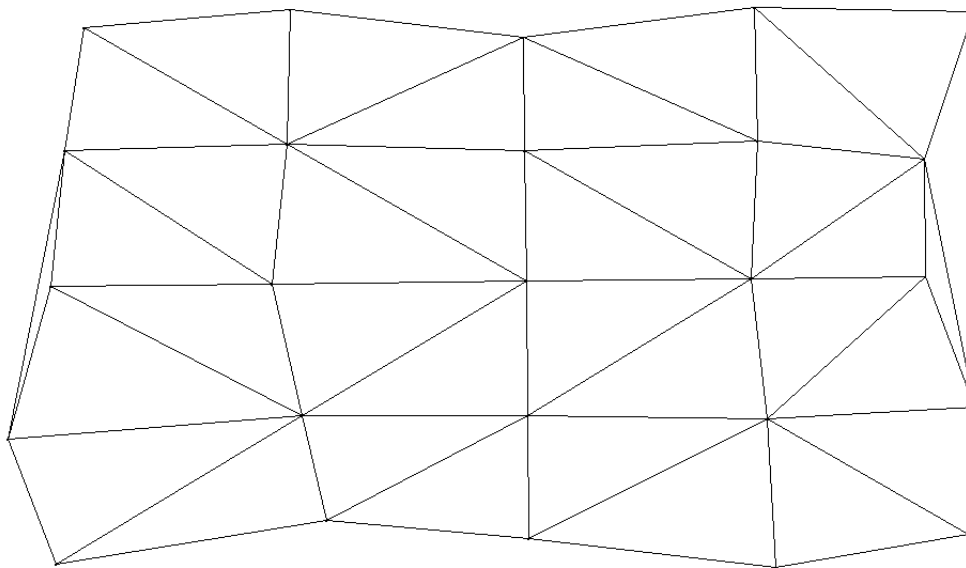


Figura 77. Red Irregular de Triángulos en Topo3

La vista gráfica del modelo digital del terreno en el software construido y en el software Topo3 presenta una Red Irregular de Triángulos igual, formada por 34 triángulos en ambos software.

5.2.2.1. Curvas de Nivel

Para validar las curvas de nivel se crean 3 escenarios a partir de la equidistancia de las alturas de los triángulos del MDT.

Escenario 1: Curvas de Nivel a 25 metros

Software desarrollado

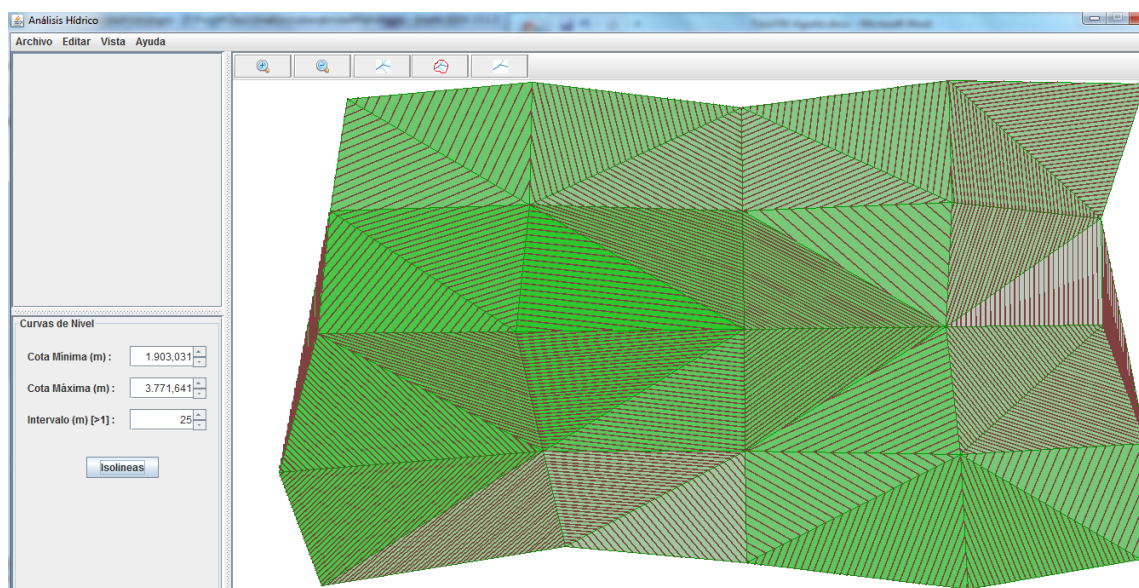


Figura 78. Curvas de nivel a 25 metros en el software desarrollado

Topo3

En Topo3 antes de crear las curvas de nivel se puede configurar parámetros asociados o dejar los valores por defecto, para este caso se modifico el parámetro Intervalo a 25.

TRIANGULAR E INTERPOLAR CURVAS DE NIVEL

Crear Triangulación (TIN) Interpolo Curvas de Nivel

PARÁMETROS

Longitud Mínima entre Puntos (m) [<10]: 0.1

Longitud Máxima del Lado del Triangulo (m) [>5.0]: 2800

Quitar Triangulos Internos

Curvas de Nivel

Cota Mínima (m): 1893 Intervalo (m) [>0.1]: 25

Cota Máxima (m): 3781 Numera cada (m): 125

Distancia entre Números (m): 28000

Longitud Mínima Segmento Curva de Nivel: 28

Segmentos de Quiebre

Longitud Máxima (m): 2800

Ajusta Coordenadas

Distancia Máxima para Ajuste (m): 0.01

Curvas de Nivel Importadas

Ajuste Modelo Digital de Terreno a Triangulos Mal Condicionados

Parábola Cúbica de Bezier

Factor de Curvatura [≥ 3]: 4

Número de Puntos Curva [≥ 5]: 10

Triangular e Interpolo Curvas de Nivel

Salir

Figura 79. Configuración Curvas de Nivel a 25 metros en Topo3

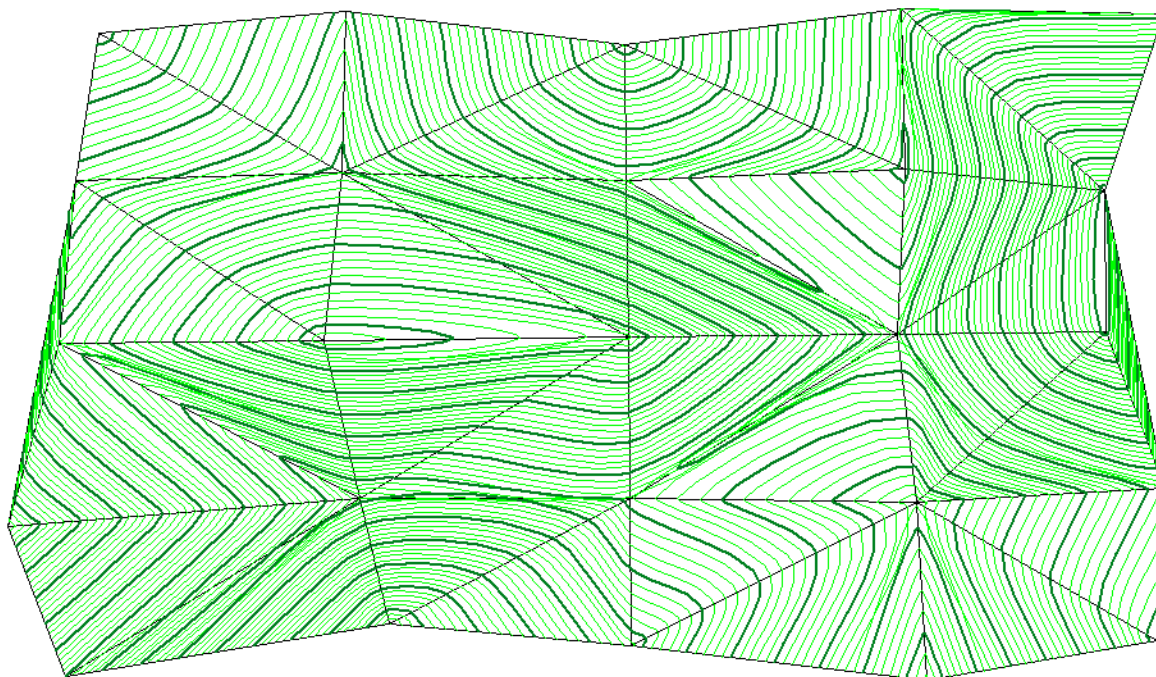


Figura 80. Curvas de nivel a 25 metros en Topo3

Escenario 2: Curvas de Nivel a 50 metros

Software desarrollado

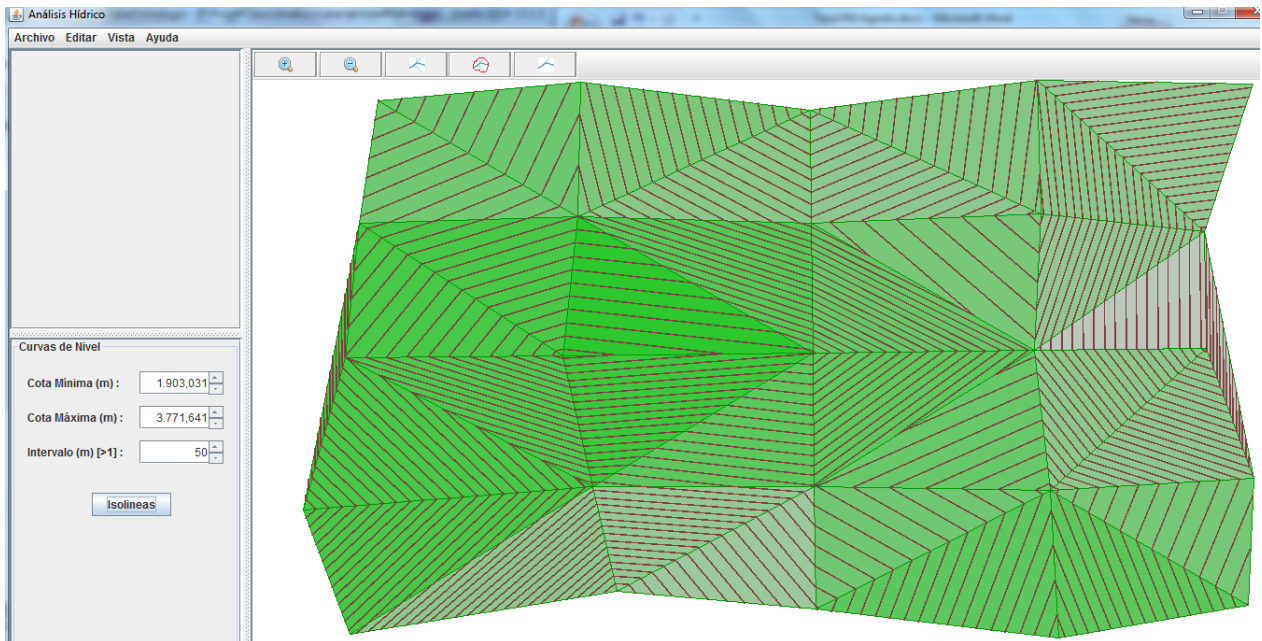


Figura 81. Curvas de nivel a 50 metros en el software desarrollado

Topo3

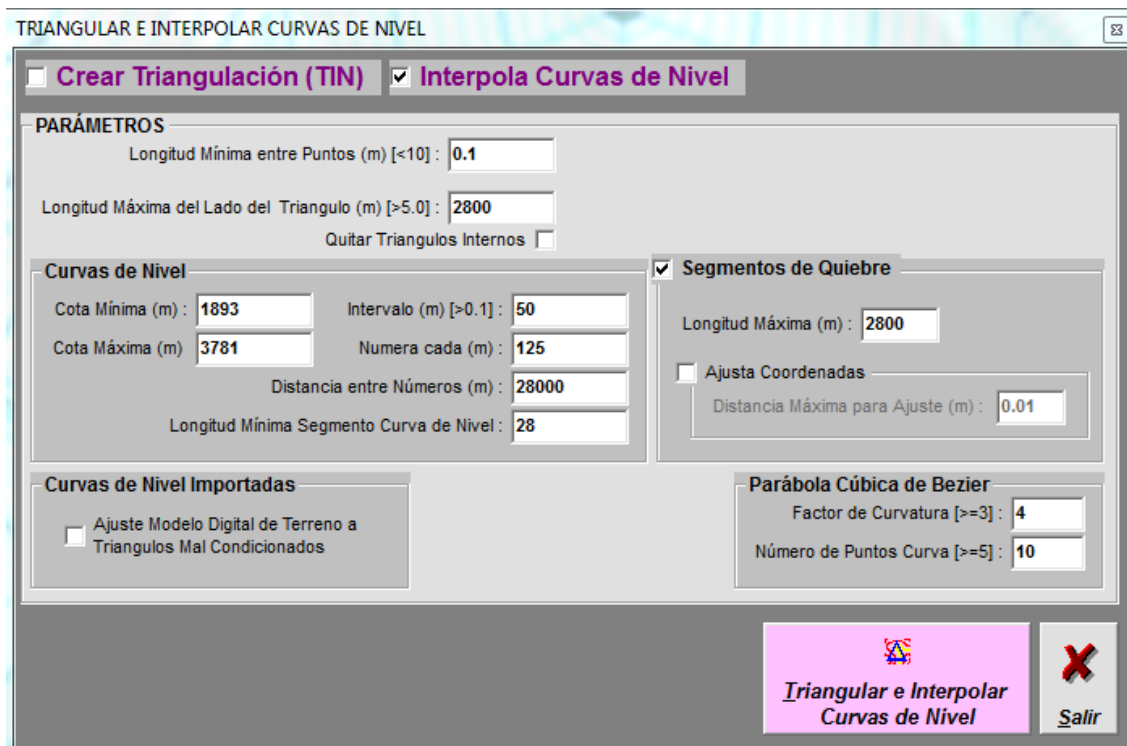


Figura 82. Configuración Curvas de Nivel a 50 metros en Topo3

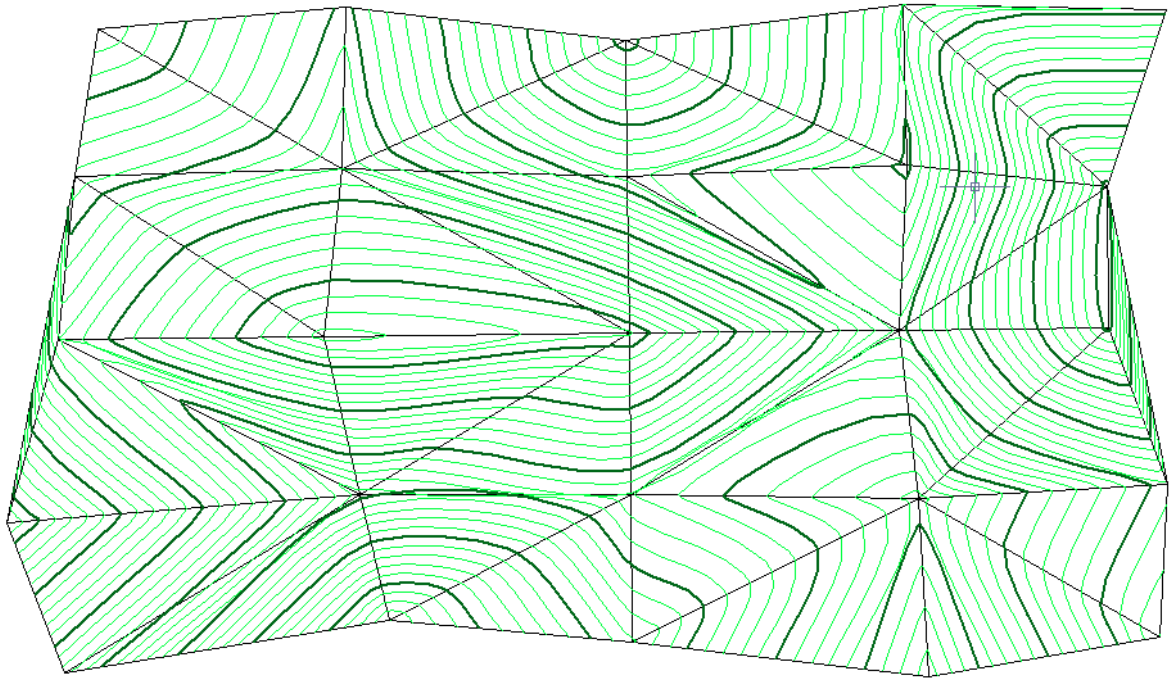


Figura 83. Curvas de nivel a 50 metros en Topo3

Escenario 3: Curvas de Nivel a 100 metros

Software desarrollado

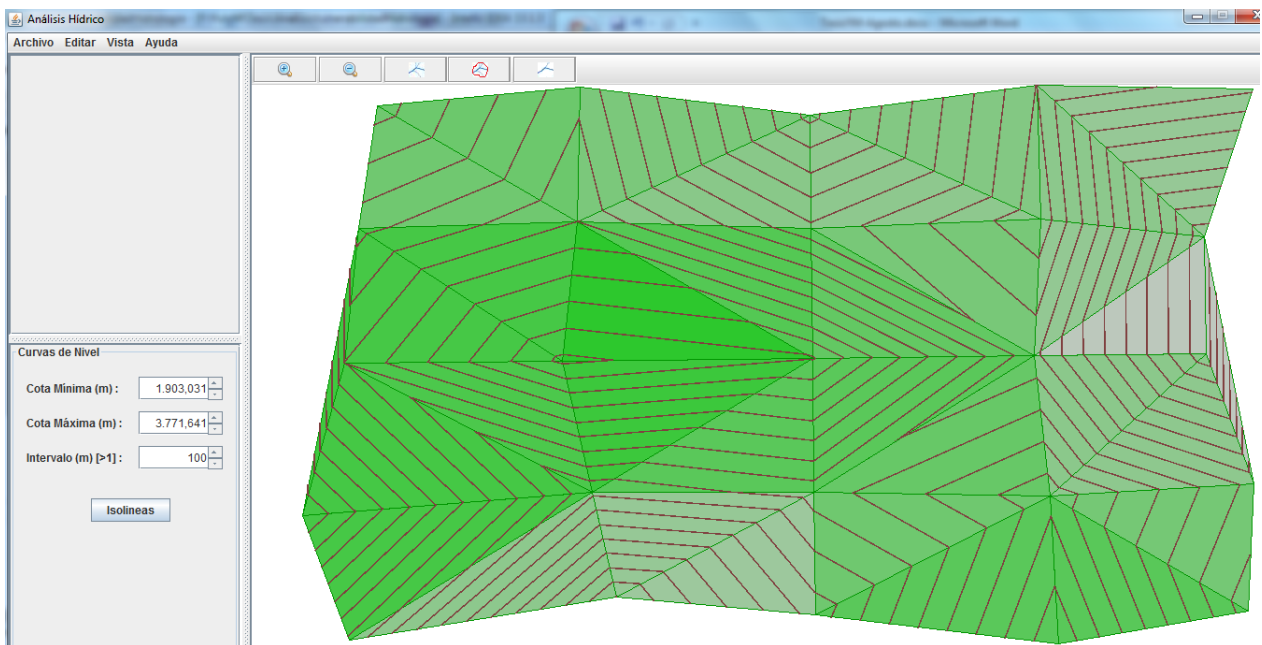


Figura 84. Curvas de nivel a 100 metros en el software desarrollado

Topo3

TRIANGULAR E INTERPOLAR CURVAS DE NIVEL

Crear Triangulación (TIN) Interpola Curvas de Nivel

PARÁMETROS

Longitud Mínima entre Puntos (m) [<10]:

Longitud Máxima del Lado del Triangulo (m) [>5.0]:

Quitar Triangulos Internos

Curvas de Nivel

Cota Mínima (m): Intervalo (m) [>0.1]:

Cota Máxima (m): Numera cada (m):

Distancia entre Números (m):

Longitud Mínima Segmento Curva de Nivel:

Segmentos de Quiebre

Longitud Máxima (m):

Ajusta Coordenadas

Distancia Máxima para Ajuste (m):


Curvas de Nivel Importadas

Ajuste Modelo Digital de Terreno a Triangulos Mal Condicionados

Parábola Cúbica de Bezier

Factor de Curvatura [≥ 3]:

Número de Puntos Curva [≥ 5]:

 **Triangular e Interpolar Curvas de Nivel**


 **Salir**

Figura 85. Configuración curvas de nivel a 100 metros en Topo3

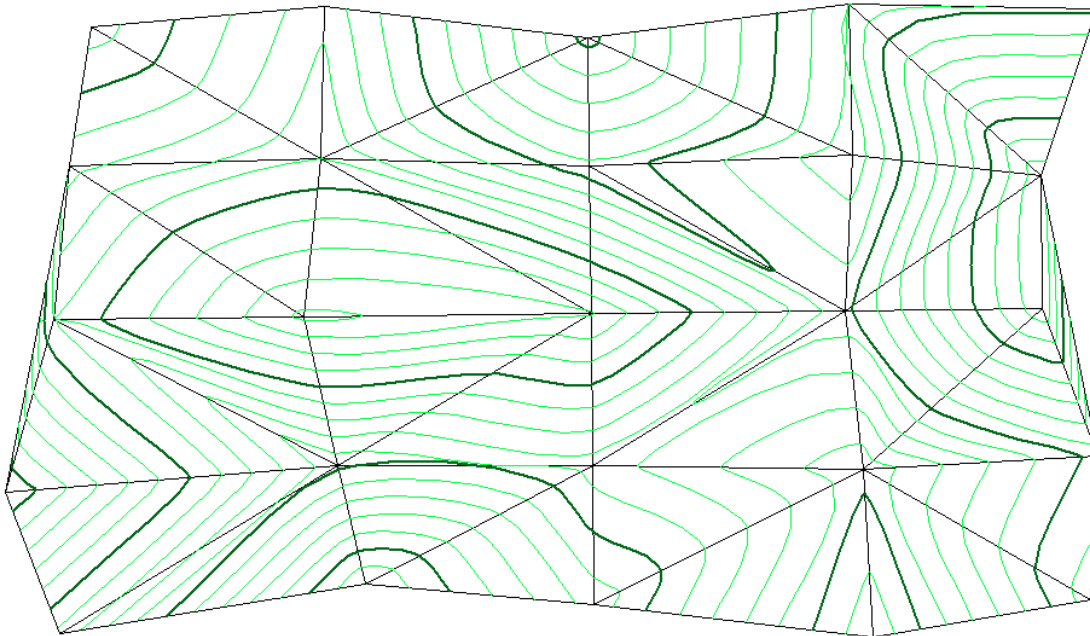


Figura 86. Curvas de nivel a 100 metros en Topo3

En los escenarios anteriormente analizados, se puede observar que las curvas de nivel en los dos software tienen la misma trayectoria a través de la Red Irregular de Triángulos.

5.2.2.2. Bandas de Elevación

Software desarrollado

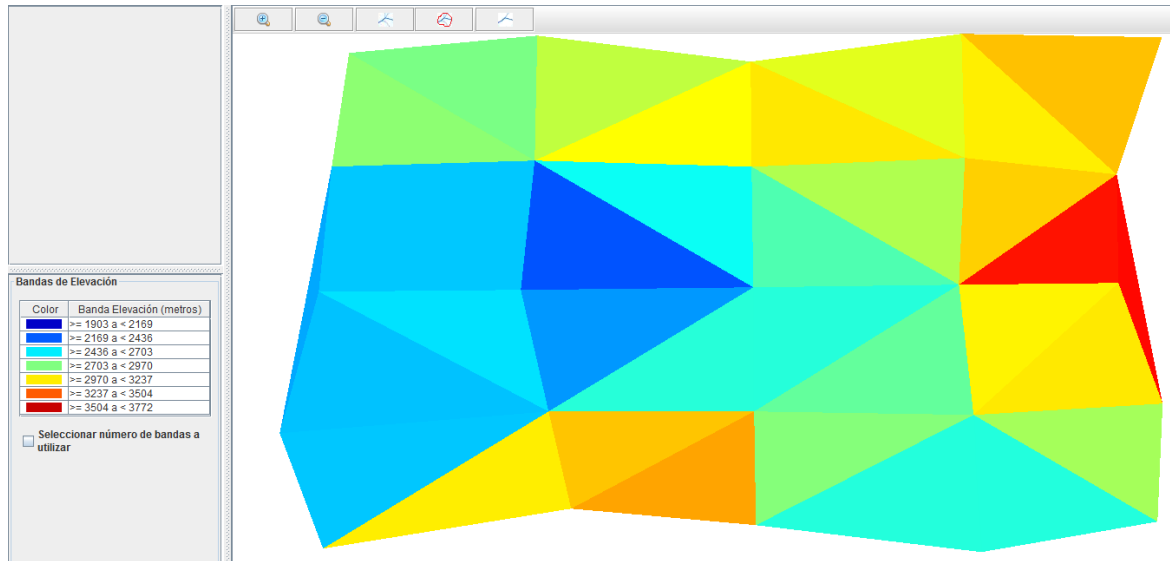


Figura 87. Bandas de elevación en el software desarrollado

Topo3

En Topo3, el manejo de colores se interpreta de la siguiente manera: colores claros para las alturas más bajas y colores más oscuros para las alturas más altas, en el caso de existir áreas asociadas a nieves, estas se representan con el color blanco.

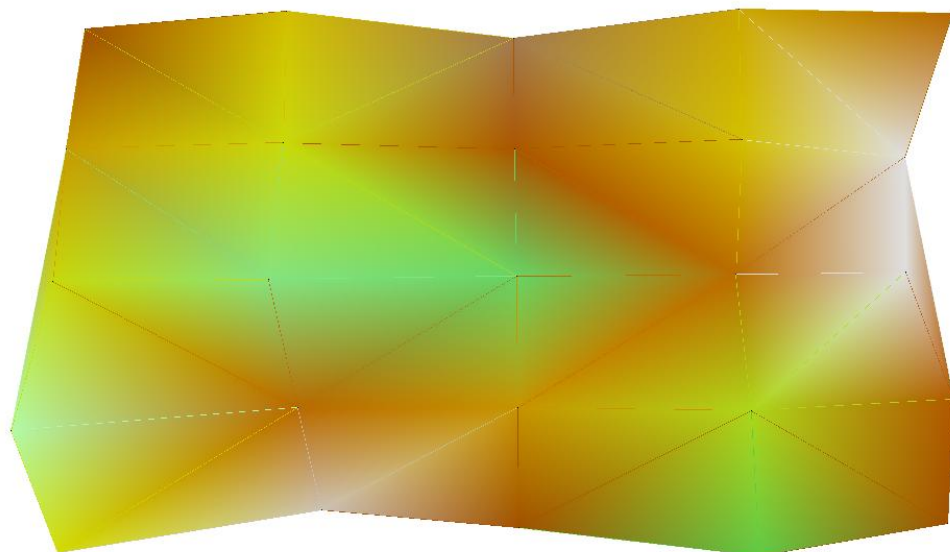


Figura 88. Bandas de Elevación en Topo3

5.2.2.3. Mapa de Pendientes

Software desarrollado

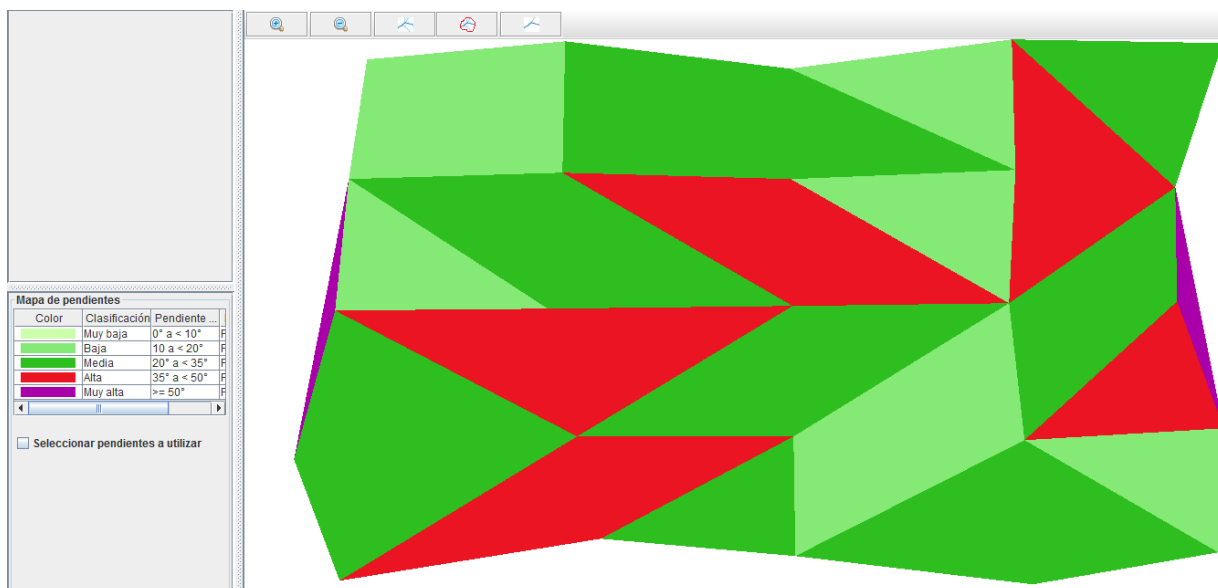


Figura 89. Mapa de pendientes en el software desarrollado

Topo3

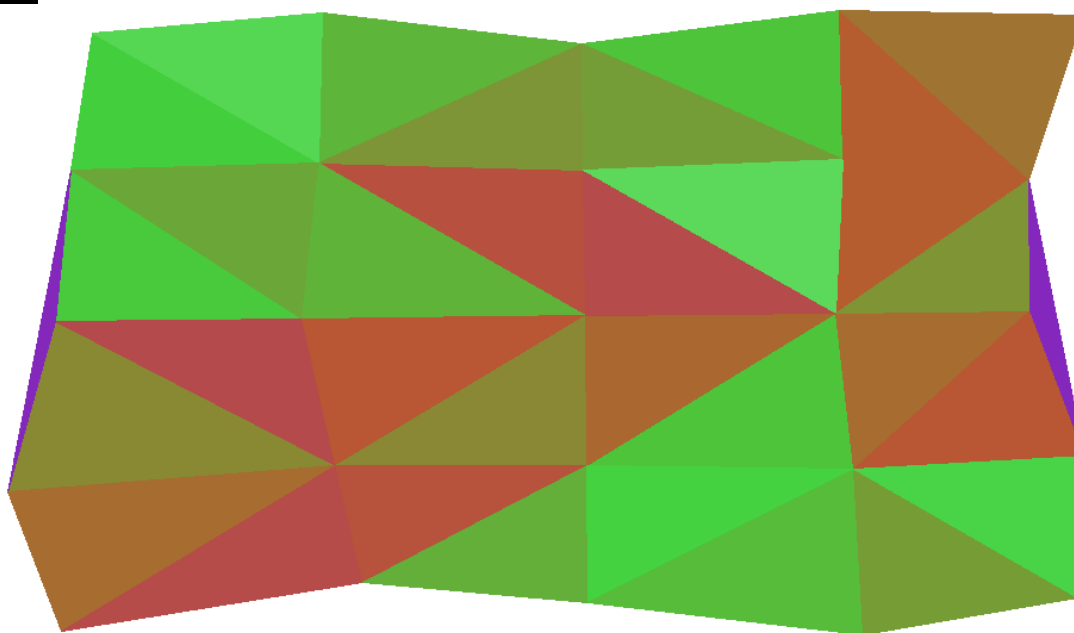


Figura 90. Mapa de pendientes en Topo3

El mapa de pendientes en el software desarrollado como en Topo3, representan en colores claros las zonas con pendientes bajas, en colores intermedios las zonas con pendientes intermedias y en colores oscuros las zonas con pendientes altas.

5.2.2.4. Orientación del Terreno
Software desarrollado

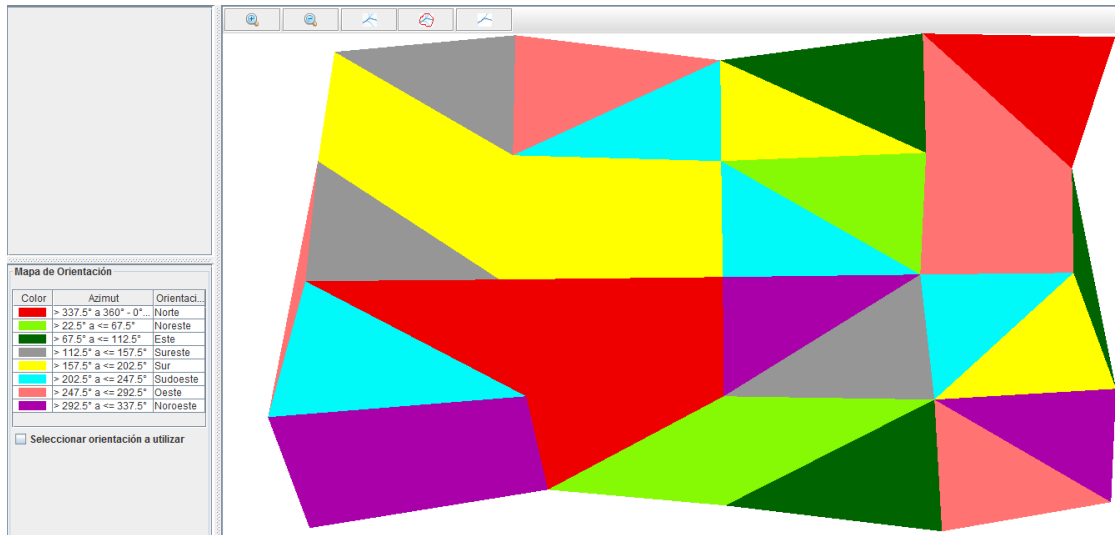


Figura 91. Orientación del terreno en el software desarrollado

Topo3

Topo3 gráfica la orientación del terreno mediante flechas, se utiliza la rosa de los vientos para interpretar las flechas y conocer la orientación del terreno.

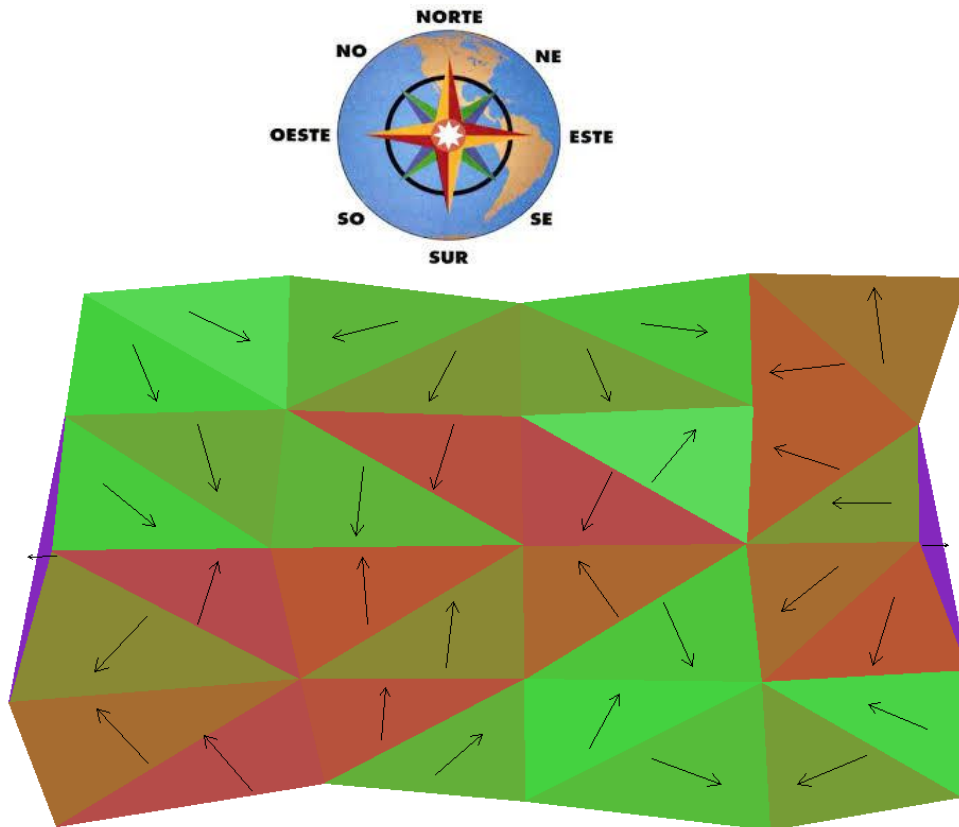


Figura 92. Orientación del terreno en Topo3

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

El software construido permite simplificar las tareas relacionadas con el modelamiento del terreno dado que facilita la obtención del modelo digital del terreno a partir de Google Earth como fuente externa, además permite configurar y crear automáticamente el conjunto de vistas asociadas a las bandas de elevación del terreno, el mapa de pendientes, el mapa de orientación del terreno que junto con los usos de suelos representan las propiedades comunes a utilizar en el cálculo de las unidades de respuesta hidrográfica.

La creación automática de las propiedades comunes y del cálculo de las unidades de respuesta hidrográfica permiten economizar tiempo, especialmente cuando no se está familiarizado con los cálculos que se deben realizar para construir tanto las propiedades representadas en las bandas de elevación, mapa de pendientes, mapa de orientación del terreno y usos de suelo, así como en la red irregular de triángulos que es la base a la hora de realizar una representación digital del terreno y operaciones asociadas a éste.

En cada zona de estudio que se trabaje, el usuario debe priorizar la información del modelo digital del terreno y de las propiedades como usos de suelo entre otras, dado que estos datos permiten tener una mayor aproximación a la realidad para homologarse a las URHs más significativas en la zona de estudio.

De las posibles triangulaciones para una nube de puntos que representan una zona de estudio, la triangulación de Delaunay es el algoritmo más utilizado para la formación de las redes de triángulos irregulares en la generación de modelos digitales del terreno, siendo la mejor para la definición del terreno. Esta triangulación se caracteriza por formar los triángulos más equiláteros posibles, maximizando el menor ángulo de cada uno haciendo que se adapte bastante bien a la superficie. Además, las posibilidades computacionales que tiene la triangulación de Delaunay son muy interesantes puesto que se trata de un algoritmo óptimo y de mínima complejidad, algo importante a la hora de la generación de modelos digitales del terreno donde se procesan millones de puntos, y es preciso hacerlo con poco espacio en memoria y en el menor tiempo posible.

Aunque la prueba de funcionalidad del software se realizó con una nube de 25 puntos de una zona de estudio, se cumplió el objetivo planteado “diseñar e implementar un software que permita procesar el conjunto de características comunes: pendiente, elevación, usos de suelo y orientación del terreno, que influyen en la respuesta hidrológica de la cuenca, con el fin de analizar y/o evaluar el grado de representatividad de la cuenca mediante unidades de respuesta hidrológica”.

6.2. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

El trabajar con software para procesamiento y modelamiento digital del terreno constituye un desafío muy interesante y enriquecedor, dado que la mayoría de sistemas existentes en el mercado en éste campo son “cajas negras” de los cuales no se conocen los procedimientos y algoritmos utilizados para los procesos de cálculos y diseños, debido a que la mayoría de éstos sistemas son desarrollados en otros países en donde la topografía y criterios de análisis son diferentes a los que se quieren aplicar en la zona de estudio.

El software desarrollado en el presente proyecto puede ser utilizado y mejorado para lograr un grado de representatividad más real de la zona de estudio, las mejoras comprenderían:

- ✓ Incorporación de las forzantes meteorológicas que se presentan en la zona de estudio y su influencia en la representatividad de la cuenca.
- ✓ Validar las unidades de respuesta hidrológica (URH) obtenidas mediante el software desarrollado con las URHs construidas de manera manual o las obtenidas mediante otro software a partir de las características comunes: pendiente, elevación, usos de suelo y orientación del terreno.
- ✓ Ampliar el conjunto de características comunes: pendiente, elevación, usos de suelo y orientación del terreno, de acuerdo con las características del terreno que ayuden a mejorar el análisis y representatividad de la cuenca.

UTM: El **sistema de coordenadas universal transversal de Mercator** (en inglés *Universal Transverse Mercator*, **UTM**) es un sistema de coordenadas basado en la proyección cartográfica transversa de Mercator, que se construye como la proyección de Mercator normal, pero en vez de hacerla tangente al Ecuador, se la hace tangente a un meridiano.

URH: Unidades de Respuesta Hidrográfica.

MDT: Modelo digital del terreno.

MED: Modelo de elevación digital.

Rosa de los Vientos: Una *rosa de los vientos* es un círculo que tiene marcados alrededor los rumbos en que se divide la circunferencia del horizonte.

BIBLIOGRAFÍA

Burrough, P. (1986). Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment. En *Monographs on Soil and Resources Survey No. 12* (pág. 193). Oxford University Press.

Campo Aranda, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. San Luis Potosí, México.

De Berg, M. V. (2000). *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. Berlin: Ed. Springer.

Felicísimo, A. (1994). *Modelos digitales de terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Oviedo: Pentalfa Ediciones.

Instituto Nacional de Tecnologías de la Comunicación. Laboratorio Nacional de Calidad del Software. (Marzo de 2009). *Ingeniería del Software: Metodologías y Ciclos de Vida*. Recuperado el 7 de Octubre de 2014, de Inteco: https://www.inteco.es/file/N85W1ZWFHifRgUc_oY8_Xg

Irvine, K. M. (2002). *The application of mathematical models as decision - support tools. Water Framework Directive*. Ireland.

Klingebiel, A. H. (1987). Use of slope, aspect and elevation maps derived from digital elevation model data in making soil surveys. *Soil Science Society of America Spacial Publication N. 20* , 77-90.

Llamas, J. (1993). *Hidrología general: Principios y aplicaciones*. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.

Miller, C. L. (1958). The digital terrain model – theory and application. *Photogrammetric Engineering* , 24(3): 433-442.

Morales Arroyo, L. M. (2010). *PROYECTO MICROCUENCA PLANTÓN-PACAYAS. Modelo Hidrológico SWAT como herramienta para procesos de toma de decisión. Documento técnico Nº 14 Área evaluación de tierras*. San José, Costa Rica.

Petri, G. a. (1990). Introduction to terrain modellin-application fields and terminology. En G. a. Petri, *Terrain modelling in surveying and civil engineering* (págs. 1-3). Whittles Publishing.

Vieux, B. E. *Vflo™: un modelo hidrológico distribuido a tiempo real*.

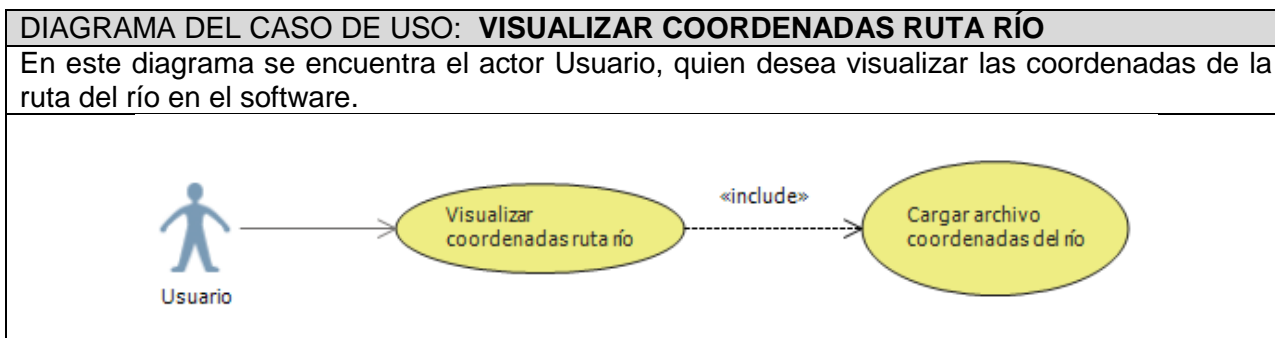
A.1. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS CASOS DE USO

A continuación se presenta el análisis y diseño de los casos de uso que se presentaron en el capítulo 3, ítem 3.2.3 - Diagrama general de casos de uso.

A.1.1 Caso de uso: Visualizar coordenadas ruta río

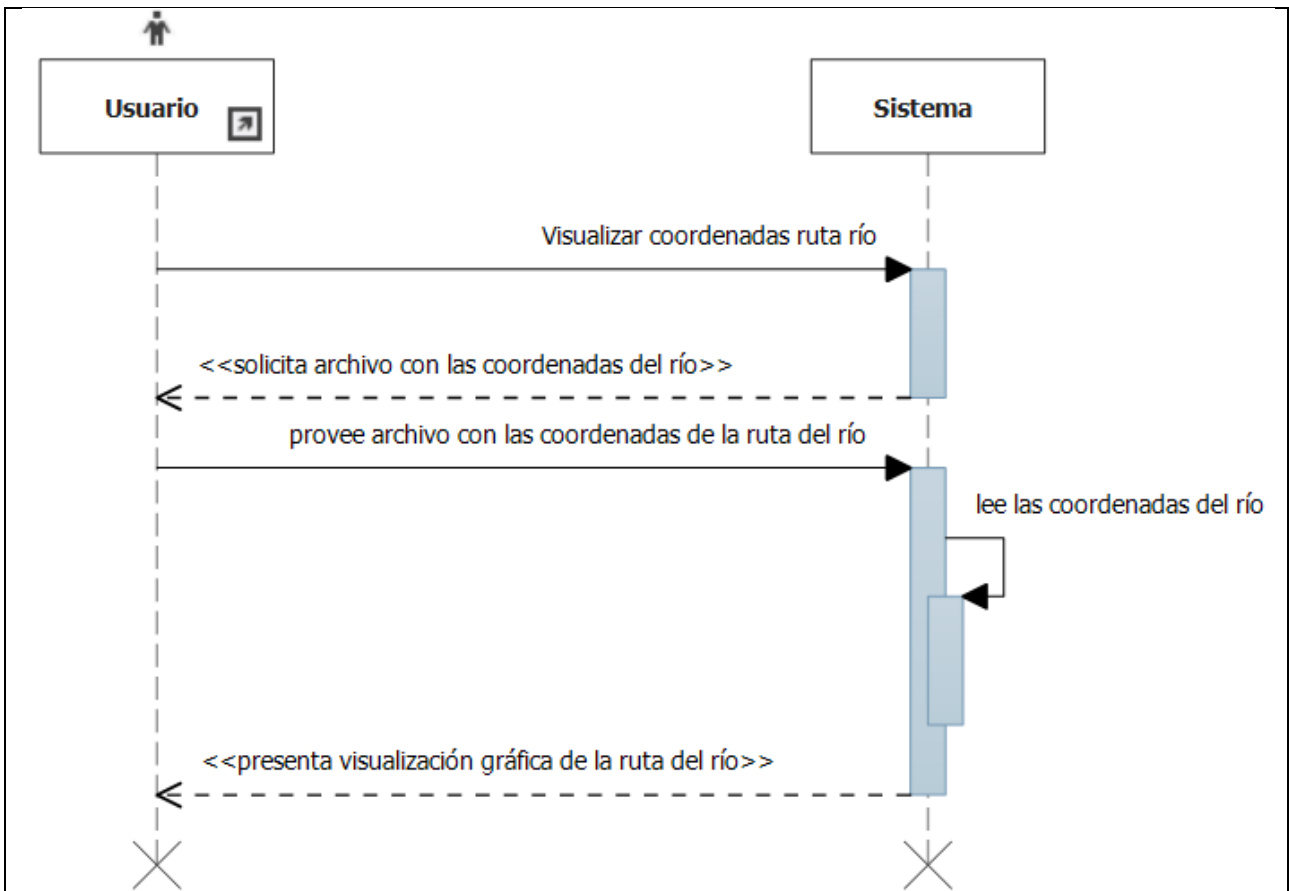
A.1.1.1 Análisis

El diagrama de caso de uso planteado a continuación, presenta la gestión de toda la información asociada a la visualización de la ruta del río.



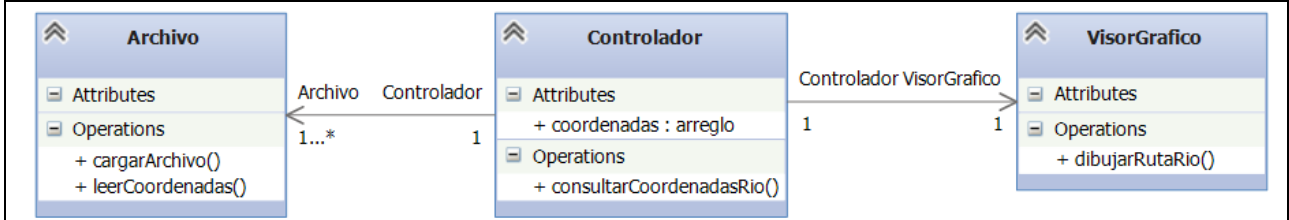
A continuación, se analizan cada una de las operaciones que conforman el caso de uso: Visualizar ruta del río, mostrado en el diagrama anterior.

FORMATO CASO DE USO: VISUALIZAR COORDENADAS RUTA RÍO	
Actores	
<ul style="list-style-type: none"> • Usuario (Iniciador) 	
Este caso de uso comienza cuando el usuario realiza la visualización de las coordenadas de la ruta del río. El sistema solicita el archivo que contiene las coordenadas del río para su lectura y respectiva visualización.	
Este caso de uso finaliza cuando el sistema despliega la visualización de la ruta del río, o el usuario abandona el proceso o cierra la aplicación.	
Acción del Actor	Respuesta del Sistema
1. El usuario decide visualizar la ruta del río en la aplicación.	2. El sistema solicita el archivo plano que contiene las coordenadas UTM del río.
	3. El sistema lee las coordenadas y realiza la visualización gráfica de la ruta del río.
4. El usuario visualiza gráficamente la ruta del río.	
DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO	
Este diagrama muestra todo el proceso necesario que realiza el actor Usuario para ejecutar el caso de uso Visualizar ruta río.	



MODELO CONCEPTUAL DEL CASO DE USO

En el modelo conceptual, se destacan los conceptos más importantes para el caso de uso Visualizar ruta río.



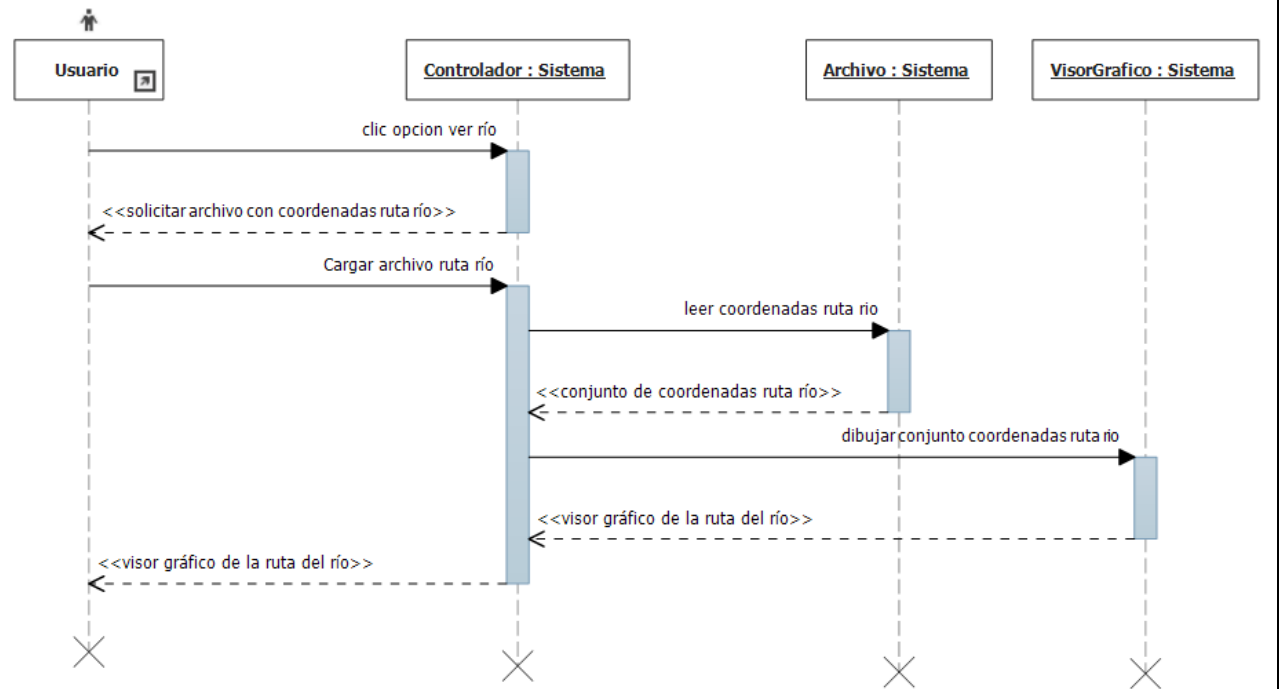
A.1.1.2 Diseño

FORMATO CASO DE USO: VISUALIZAR COORDENADAS RUTA RÍO	
Actores	
Usuario (Iniciador)	
Este caso de uso comienza cuando el usuario decide visualizar la ruta del río en la aplicación, el sistema solicita al usuario el archivo plano que contiene las coordenadas UTM de la ruta del río, el sistema lee las coordenadas del río y procede a visualizarlas gráficamente en la aplicación.	
Acción del Actor	Respuesta del Sistema
1. El usuario decide visualizar la ruta del río en la aplicación mediante la opción Ver río del menú Vista.	2. El sistema solicita el archivo plano que contiene las coordenadas UTM del río.
	3. El sistema lee las coordenadas y realiza la

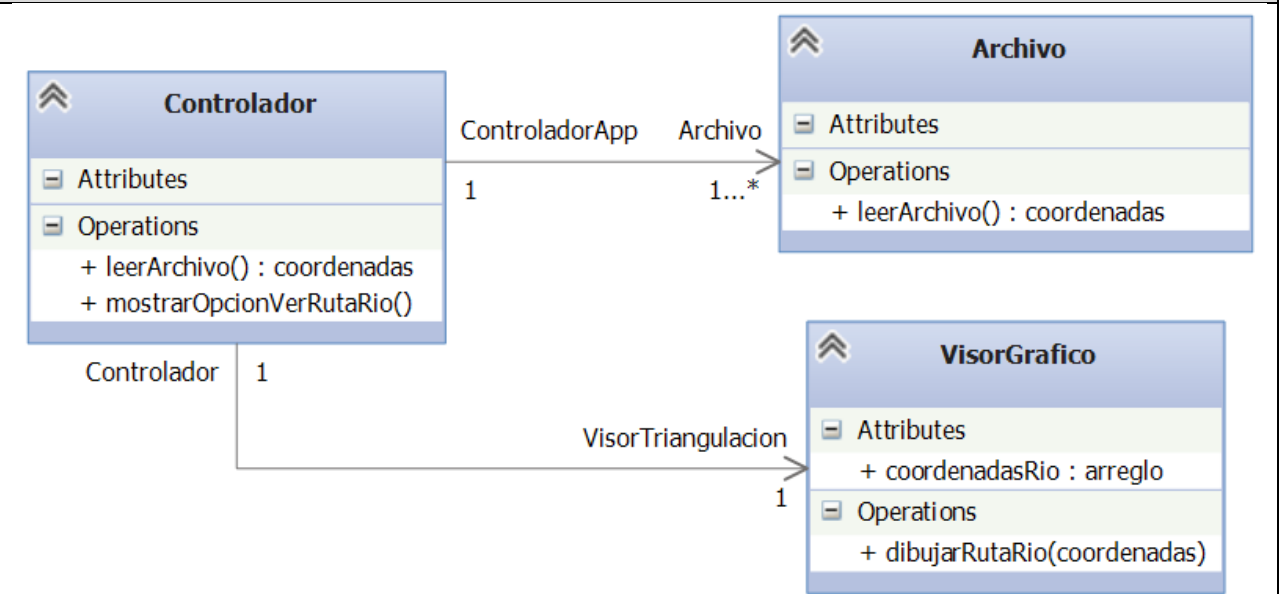
	visualización gráfica de la ruta del río.
4. El usuario visualiza gráficamente la ruta del río.	

CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO

El usuario hace clic sobre la opción Ver Río del submenú Río del menú Vista, el sistema solicita el archivo de texto que contiene las coordenadas del río que se quiere visualizar. Una vez la aplicación lee las coordenadas, visualizará gráficamente la ruta del río.



CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE CLASES DEL CASO DE USO

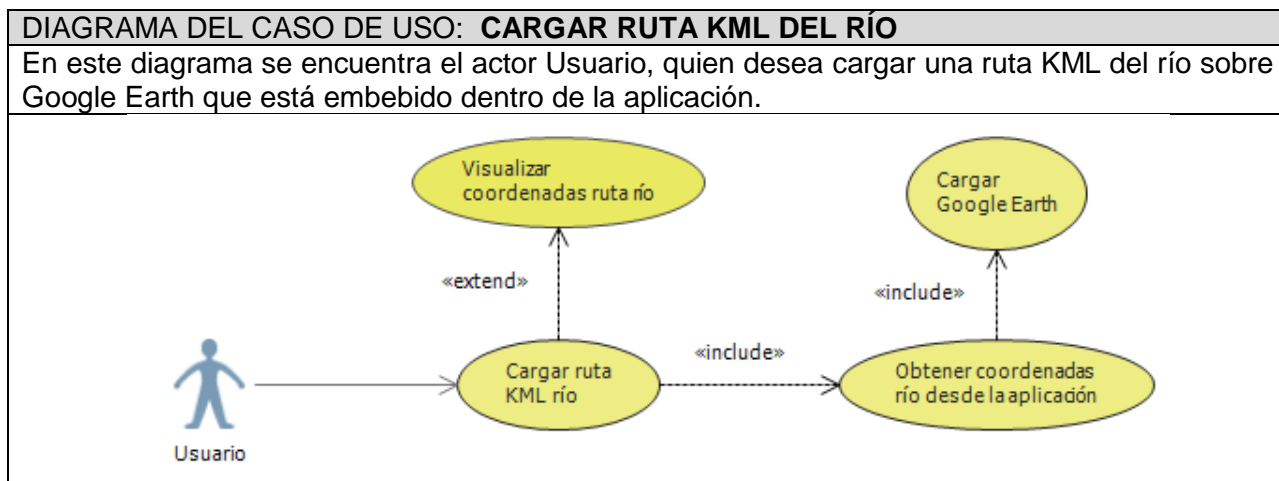


En la aplicación la clase Controlador se encarga de administrar las peticiones que realiza el usuario, delegarlo a la clase encargada, por ejemplo, delegar a la clase Archivo la lectura de las coordenadas del archivo KML de la ruta del río, también delegar al VisorGrafico la tarea de realizar la representación gráfica de la ruta del río a ser presentada al usuario.

A.1.2 Caso de uso: Cargar ruta KML del río

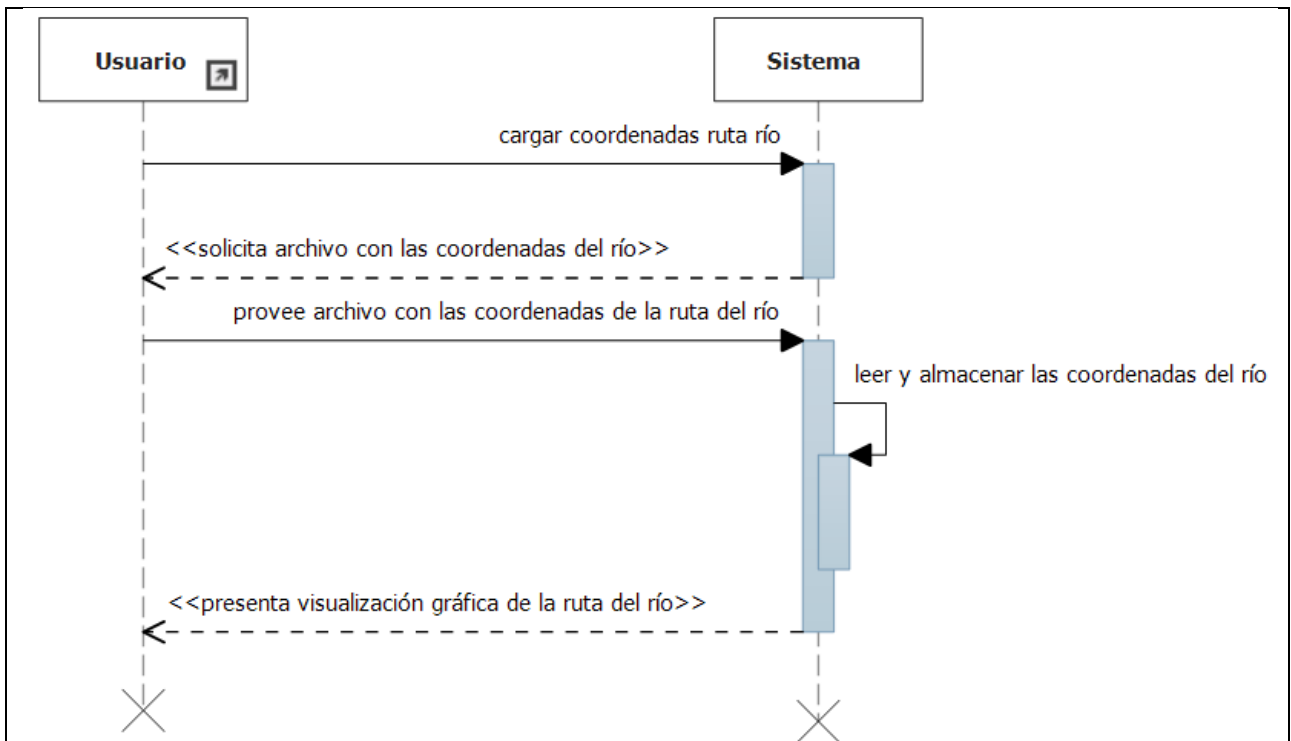
A.1.2.1 Análisis

El diagrama de caso de uso planteado a continuación, presenta la gestión de toda la información asociada al momento de carga una ruta KML de río.



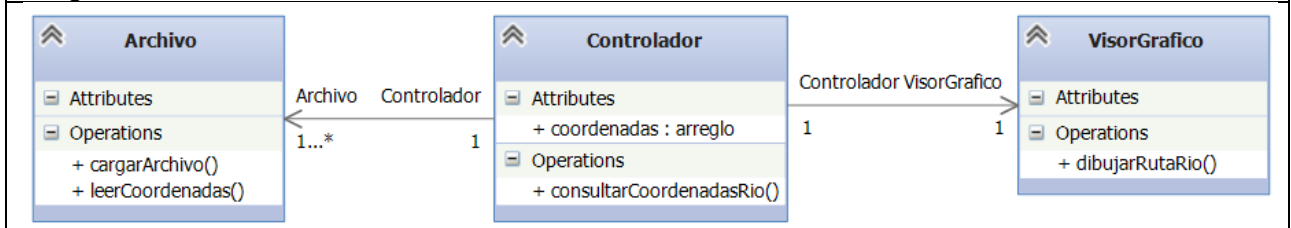
A continuación, se analizan cada una de las operaciones que conforman el caso de uso: Cargar ruta KML del río, mostrado en el diagrama anterior.

FORMATO CASO DE USO: CARGAR RUTA KML DEL RÍO	
Actores	
♦ Usuario (Iniciador)	
Este caso de uso comienza cuando el usuario decide cargar la ruta KML del río en el visor Google Earth que está embebido dentro de la aplicación. El sistema obtiene las coordenadas de la ruta kml y proceder a visualizar el río en Google Earth. Este caso de uso finaliza cuando el sistema carga la ruta del río, o el usuario abandona el proceso o cierra la aplicación.	
Acción del Actor	Respuesta del Sistema
1. El usuario decide cargar la ruta KML del río en el Google Earth embebido dentro de la aplicación.	2. El sistema solicita el archivo KML que contiene las coordenadas del río.
	3. El sistema lee las coordenadas y realiza la visualización gráfica de la ruta KML del río.
4. El usuario visualiza gráficamente la ruta KML del río.	
DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO	
Este diagrama muestra todo el proceso necesario que realiza el actor Usuario para ejecutar el caso de uso Cargar ruta KML del río.	



MODELO CONCEPTUAL DEL CASO DE USO

En el modelo conceptual, se destacan los conceptos más importantes para el caso de uso Cargar ruta KML del río.

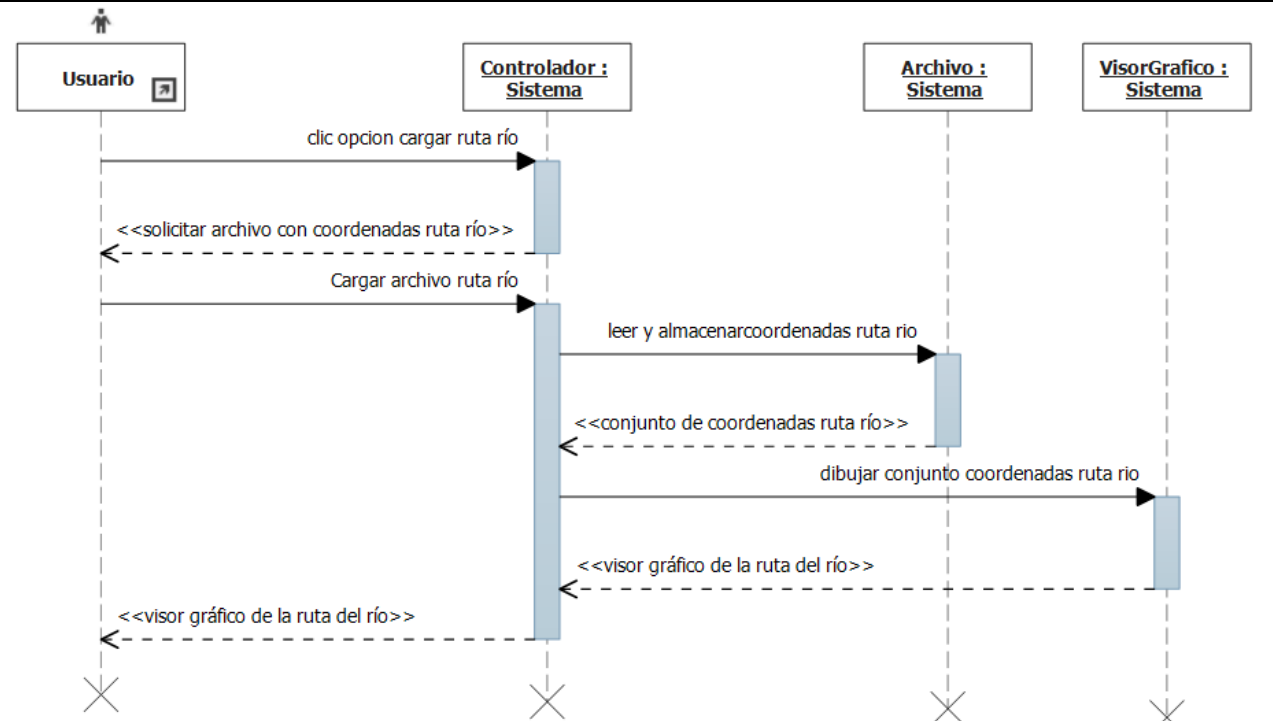


A.1.2.2 Diseño

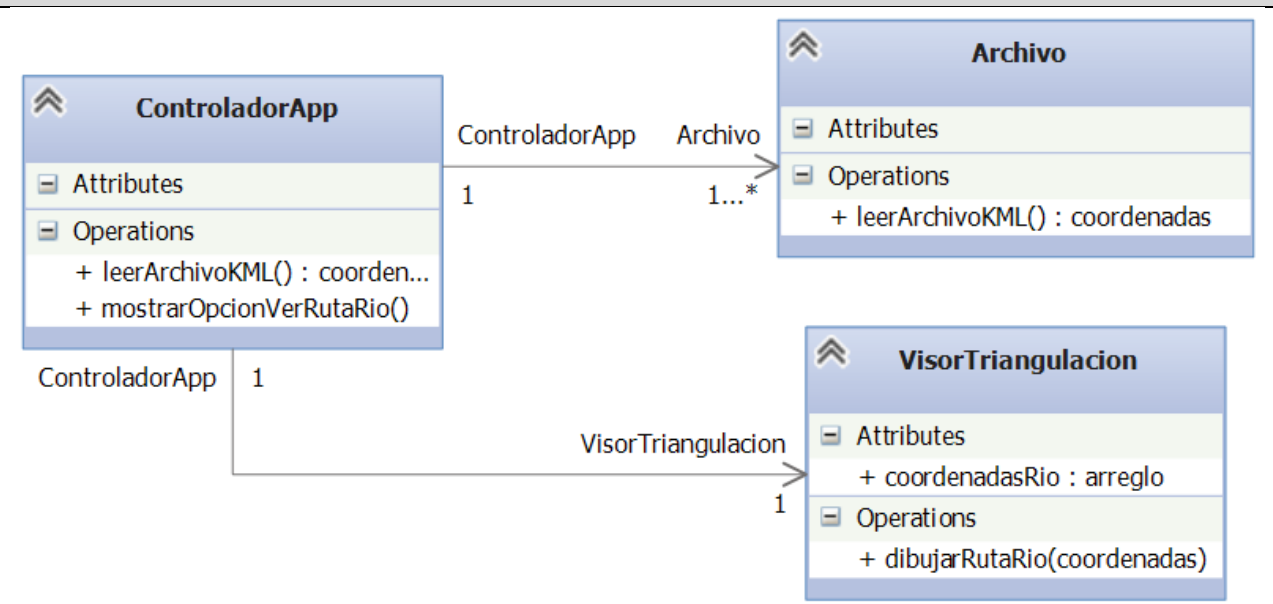
FORMATO CASO DE USO: CARGAR RUTA KML DEL RÍO	
Actores	
Usuario (Iniciador)	
Este caso de uso comienza cuando el usuario decide cargar la ruta KML del río en la aplicación, el sistema solicita al usuario el archivo KML que contiene las coordenadas de la ruta del río, el sistema lee las coordenadas y procede a visualizarlas gráficamente la ruta KML en la aplicación.	
Acción del Actor	Respuesta del Sistema
1. El usuario decide cargar la ruta KML del río en la aplicación.	2. El sistema solicita el archivo KML que contiene las coordenadas del río.
	3. El sistema lee las coordenadas y realiza la visualización gráfica de la ruta del río.
4. El usuario visualiza gráficamente la ruta del río.	
CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL	

CASO DE USO

El usuario hace clic sobre la opción KML del submenú Google Earth del menú Vista, el sistema solicita el archivo KML que contiene las coordenadas del río que se quiere visualizar. Una vez la aplicación lee las coordenadas, visualizará gráficamente la ruta del río.



CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE CLASES DEL CASO DE USO

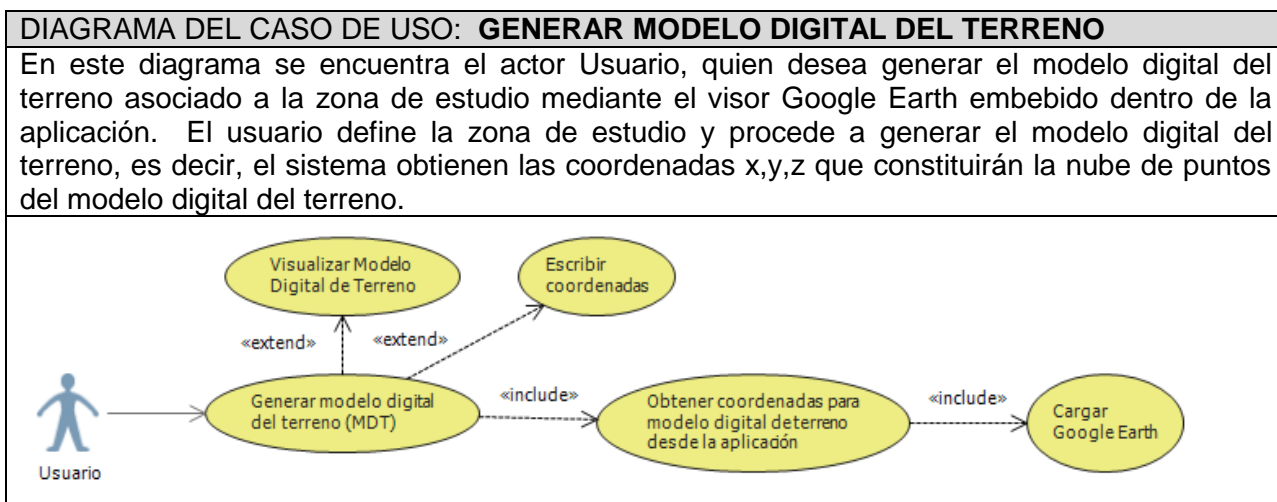


En la aplicación la clase ControladorApp se encarga de administrar las peticiones que realiza el usuario, delegarlo a la clase encargada, por ejemplo, delegar a la clase Archivo la lectura de las coordenadas del archivo de la ruta del río, también delegar al VisorTriangulación la tarea de realizar la representación gráfica de la ruta del río a ser presentada al usuario.

A.1.3 Caso de uso: Generar modelo digital del terreno

A.1.3.1 Análisis

El diagrama de caso de uso planteado a continuación, presenta la gestión de toda la información asociada al momento de generar el modelo digital del terreno de la zona de estudio.



A continuación, se analizan cada una de las operaciones que conforman el caso de uso: Generar modelo digital del terreno, mostrado en el diagrama anterior.

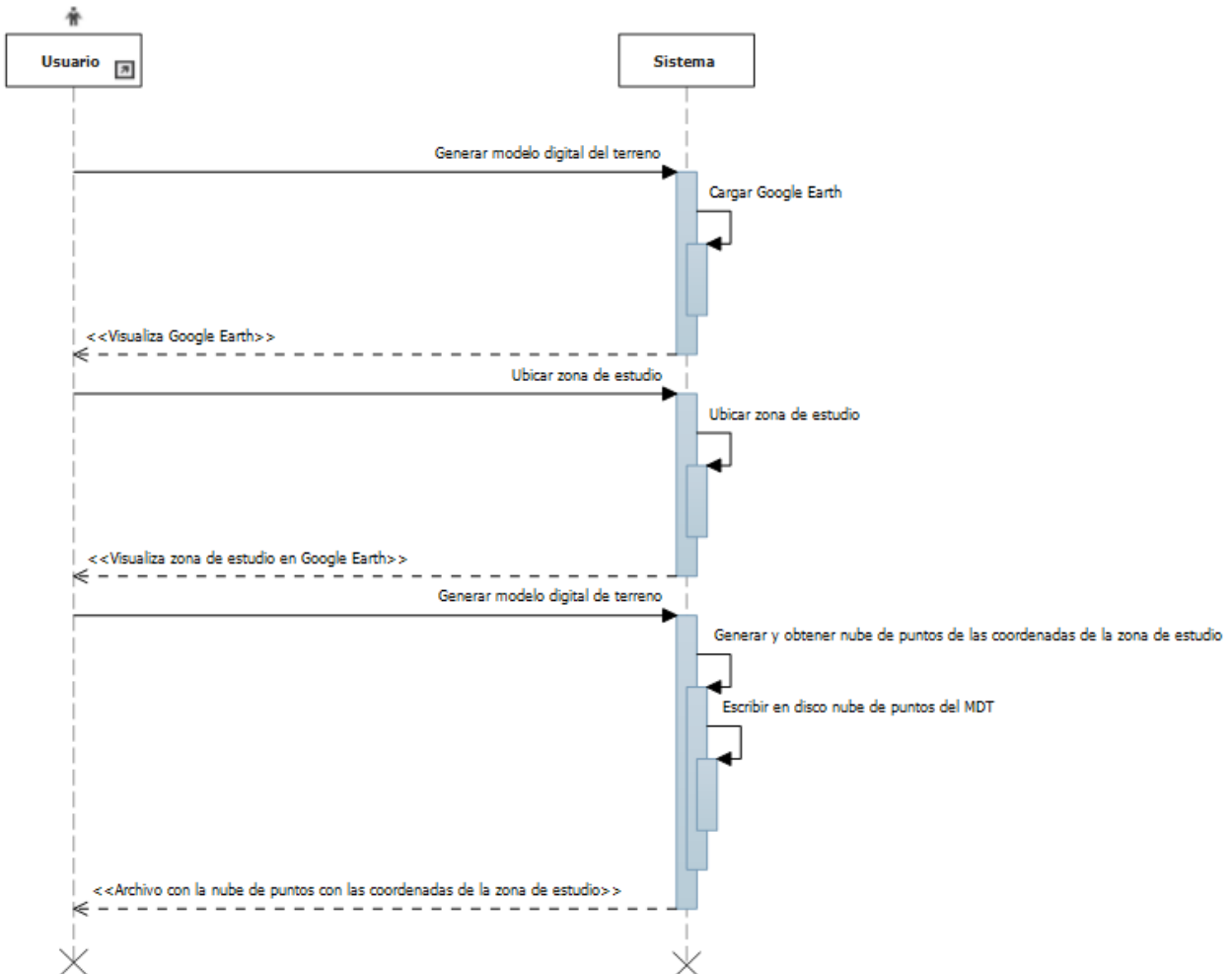
FORMATO CASO DE USO: GENERAR MODELO DIGITAL DEL TERRENO	
Actores	
♦ Usuario (Iniciador)	
Este caso de uso comienza cuando el usuario decide obtener el modelo digital del terreno de la zona de estudio a partir del Google Earth que está embebido dentro de la aplicación, el sistema provee dicha funcionalidad y el usuario localiza la zona de estudio de su interés e indica a la aplicación que desea generar el modelo digital del terreno de esa zona, la aplicación realiza las tareas necesarias para obtener el sistema de coordenadas x,y,z de la zona de estudio y dejarlas registradas en un archivo plano para el usuario. Este caso de uso finaliza cuando el sistema despliega la visualización de las coordenadas x,y,z de la zona de estudio mediante la representación gráfica de la red irregular de triángulos asociada a la misma.	
Acción del Actor	Respuesta del Sistema
1. El usuario decide obtener el modelo digital del terreno, es decir, las coordenadas x,y,z, asociadas a la zona de estudio.	2. El sistema ofrece embebido dentro de él, el visor Google Earth para que el usuario ubique la zona de la cual quiere generar el modelo digital de terreno.
3. El usuario ubica la zona de estudio en Google Earth y procede a indicar que desea generar el modelo digital de terreno de dicha zona.	4. El sistema realiza las tareas necesarias para obtener la información de las coordenadas x,y,z de la zona de estudio indicada por el usuario.
	5. Una vez finalizadas las tareas, el sistema presenta gráficamente dichas coordenadas mediante la visualización de la red irregular de triángulos y también procede a crear un archivo

con las coordenadas en el pc donde se ejecute la aplicación

6. El usuario visualiza gráficamente el modelo digital del terreno y tiene un archivo plano con las coordenadas de la zona de estudio.

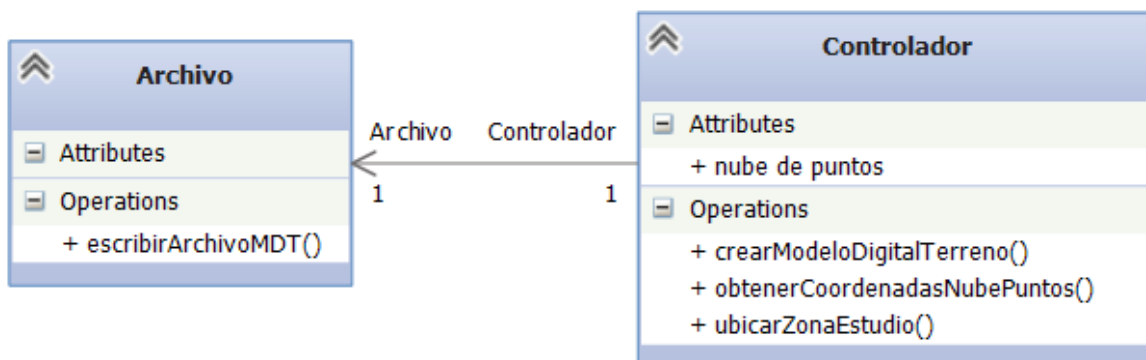
DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO

Este diagrama muestra todo el proceso necesario que realiza el actor Usuario para ejecutar el caso de uso Generar modelo digital del terreno.



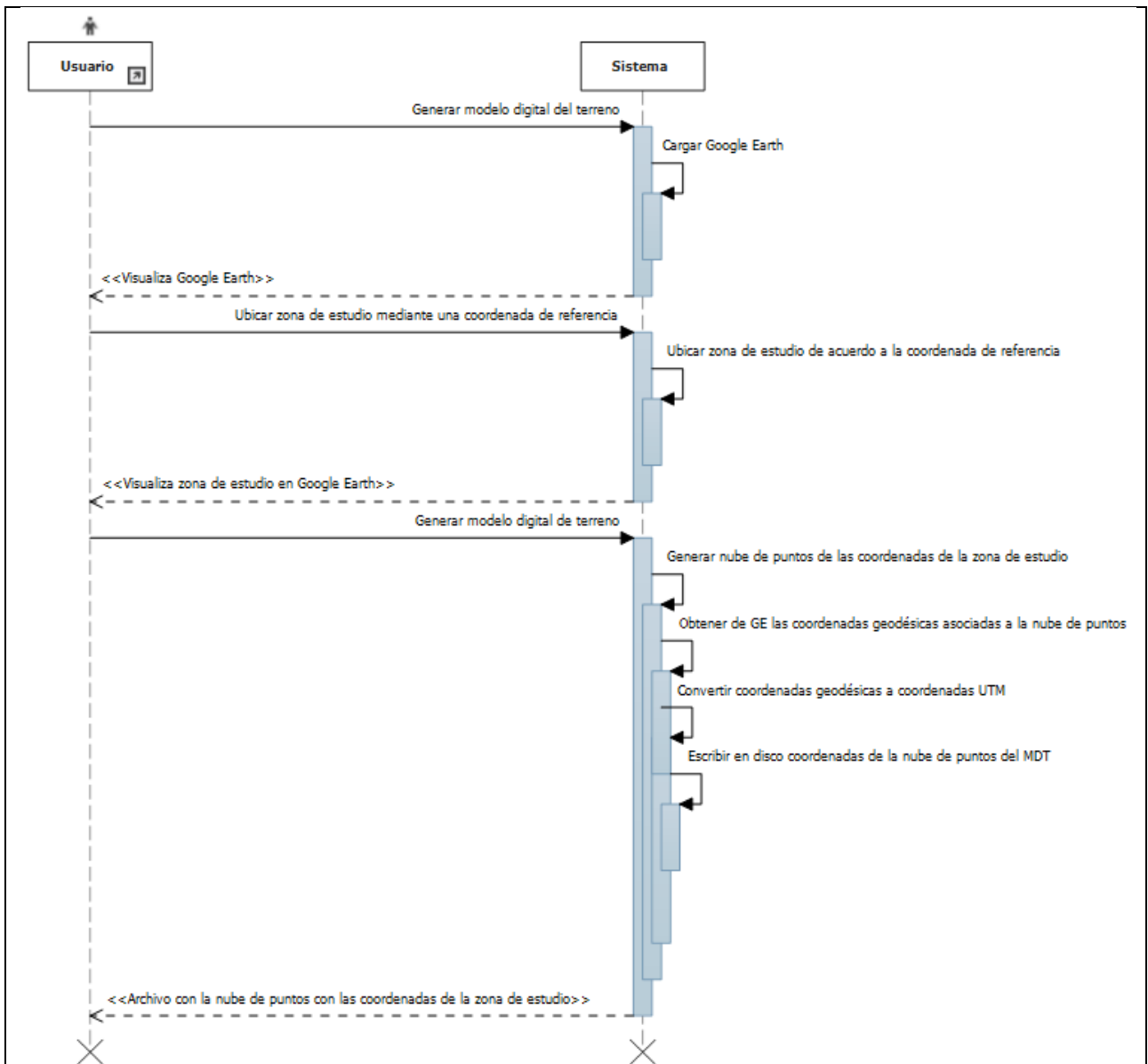
MODELO CONCEPTUAL DEL CASO DE USO

En el modelo conceptual, se destacan los conceptos más importantes para el caso de uso Generar modelo digital del terreno.

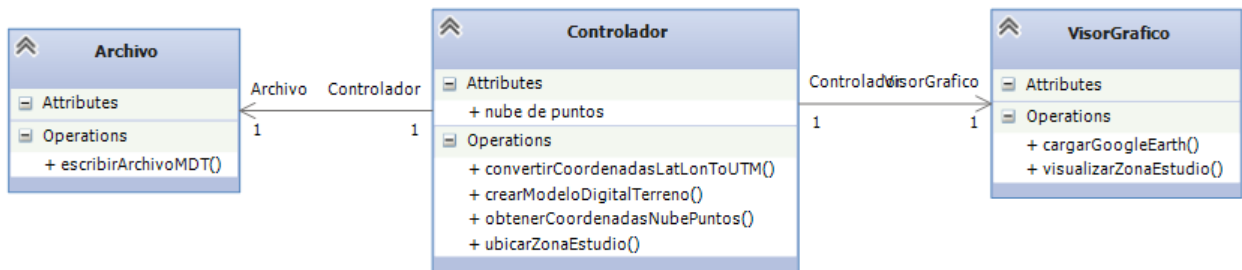


A.1.3.2 Diseño

FORMATO CASO DE USO: GENERAR MODELO DIGITAL DEL TERRENO	
Actores	
Usuario (Iniciador)	
<p>Este caso de uso comienza cuando el usuario decide obtener el modelo digital del terreno de la zona de estudio a partir del Google Earth que está embebido dentro de la aplicación, el sistema provee dicha funcionalidad mediante la opción Google Earth del menú Vista, el usuario despliega el GE para localizar la zona de estudio de su interés e indica a la aplicación que desea generar el modelo digital del terreno de esa zona dando clic sobre la opción TIN del menú Vista, la aplicación realiza las tareas necesarias para obtener el sistema de coordenadas x,y,z de la zona de estudio y dejarlas registradas en un archivo plano para el usuario.</p> <p>Este caso de uso finaliza cuando el sistema despliega la visualización de las coordenadas x,y,z de la zona de estudio mediante la representación gráfica de la red irregular de triángulos asociada a la misma.</p>	
Acción del Actor	Respuesta del Sistema
1. El usuario decide obtener el modelo digital del terreno, es decir, las coordenadas x,y,z, asociadas a la zona de estudio mediante el Google Earth que se embebe dentro de la aplicación dando clic sobre la opción Google Earth del menú Vista.	2. El sistema ofrece embebido dentro de él, el visor Google Earth para que el usuario ubique la zona de la cual quiere generar el modelo digital de terreno.
3. El usuario ubica la zona de estudio en Google Earth mediante las funcionalidades que la aplicación provee. El usuario procede a indicar que desea generar el modelo digital de terreno de dicha zona dando clic sobre la opción TIN del menú Vista.	4. El sistema realiza las tareas necesarias para obtener la información de las coordenadas x,y,z de la zona de estudio indicada por el usuario.
	5. Una vez finalizadas las tareas, el sistema presenta gráficamente dichas coordenadas mediante la visualización de la red irregular de triángulos y también procede a crear un archivo con las coordenadas en el pc donde se ejecute la aplicación.
6. El usuario visualiza gráficamente el modelo digital del terreno y tiene un archivo plano con las coordenadas de la zona de estudio.	
CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO	
<p>El usuario hace clic sobre la opción Google Earth del menú Vista, el sistema carga el visor GE, el usuario procede a ubicar la zona de estudio de su interés mediante las funcionalidades previstas por la aplicación, una vez definida la zona de estudio procede a indicar la tarea de generación del modelo digital del terreno dando clic en la opción TIN del menú Vista. Una vez la aplicación termina la tarea de generar el MDT, éste es representado gráficamente en la aplicación mediante la red irregular de triángulos, además el sistema escribe en disco un archivo con las coordenadas asociadas a la zona de estudio.</p>	



CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE CLASES DEL CASO DE USO



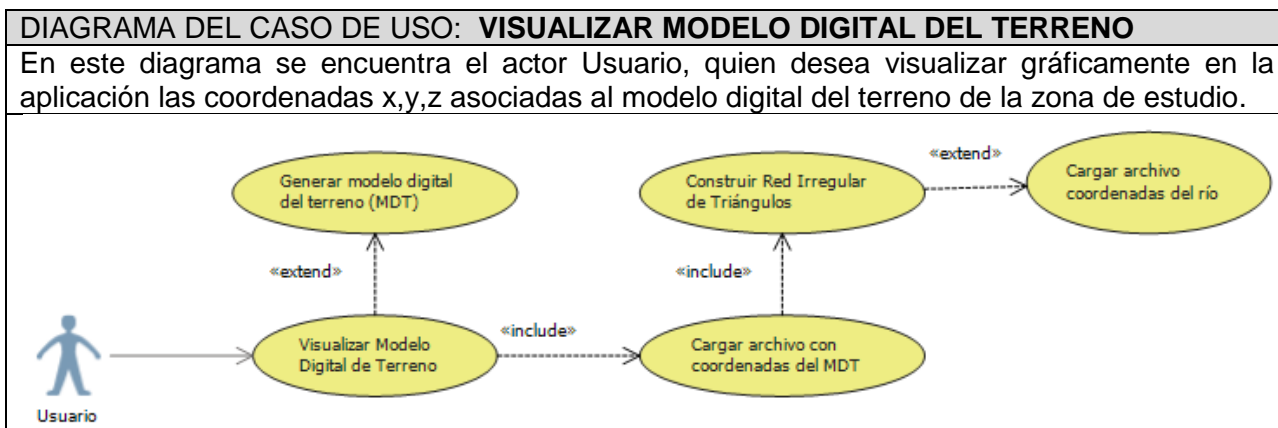
En la aplicación la clase Controlador se encarga de administrar las peticiones que realiza el usuario, delegarlo a la clase encargada, por ejemplo, delegar a la clase Archivo la escritura de las coordenadas del MDT, también delegar al VisorGrafico la tarea de realizar la representación gráfica del MDT a ser presentada al usuario.

La clase Controlador se encarga a su vez de tareas asociadas a la lógica de negocio, como lo es: generar la nube de puntos para la zona de estudio, obtener las coordenadas latitud/longitud para cada punto y a la vez convertir éstas coordenadas a coordenadas UTM para su respectiva escritura y uso en la aplicación.

A.1.4 Caso de uso: Visualizar modelo digital del terreno

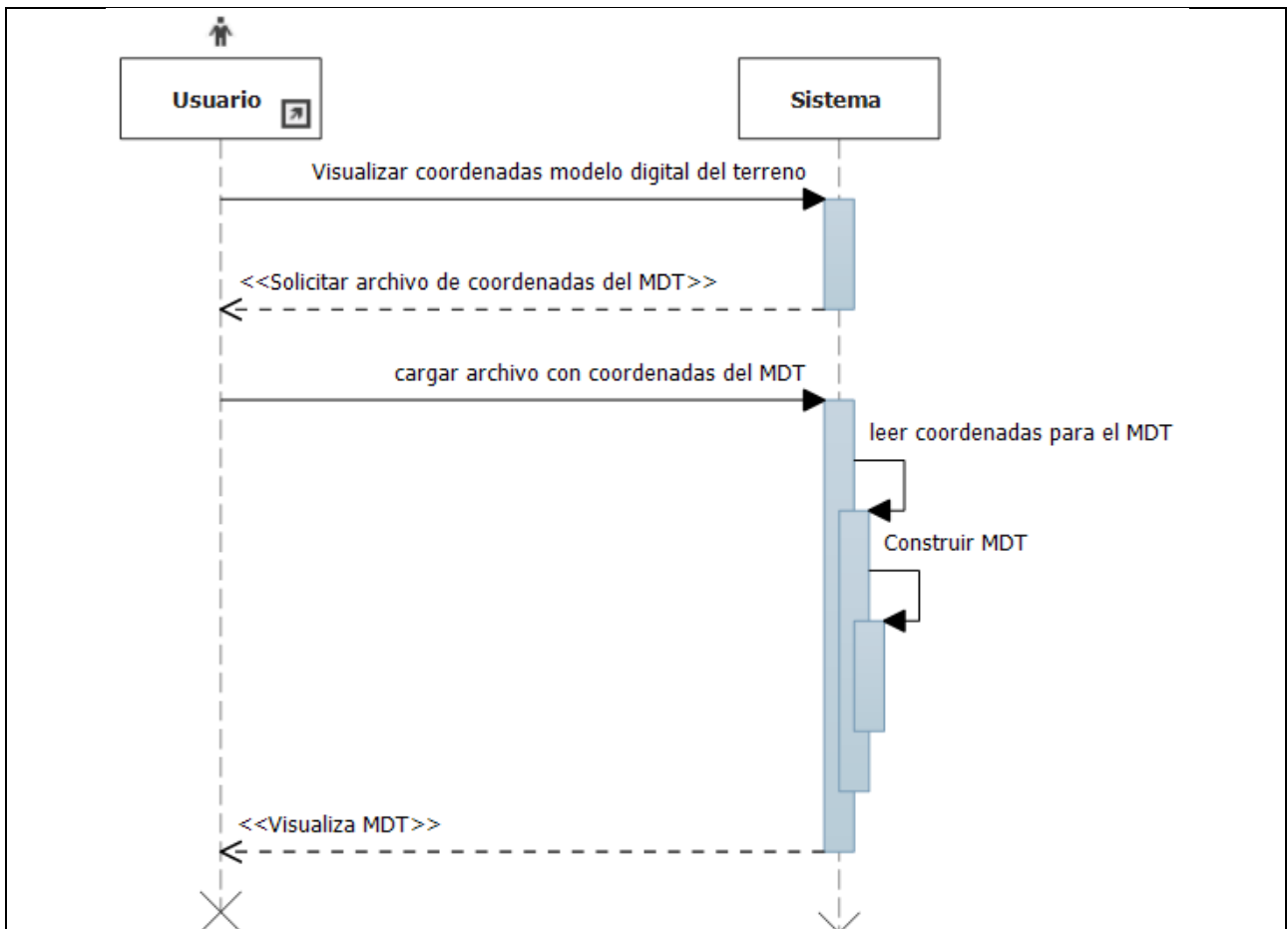
A.1.4.1 Análisis

El diagrama de caso de uso planteado a continuación, presenta la gestión de toda la información asociada al momento de visualizar el modelo digital del terreno.



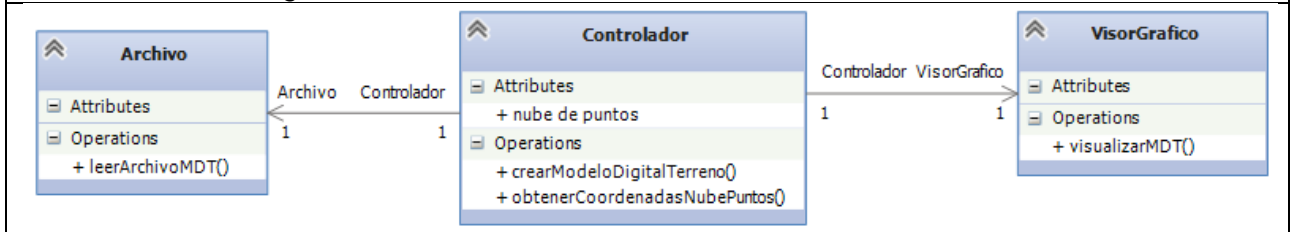
A continuación, se analizan cada una de las operaciones que conforman el caso de uso: Visualizar el modelo digital del terreno, mostrado en el diagrama anterior.

FORMATO CASO DE USO: VISUALIZAR MODELO DIGITAL DEL TERRENO	
Actores	
♦ Usuario (Iniciador)	
Este caso de uso comienza cuando el usuario realiza la visualización de las coordenadas del modelo digital del terreno de la zona de estudio. El sistema solicita al usuario el archivo que contiene las coordenadas x,y,z de la zona de estudio para su respectiva visualización. Este caso de uso finaliza cuando el sistema despliega la visualización del modelo digital del terreno, o el usuario abandona el proceso o cierra la aplicación.	
Acción del Actor	Respuesta del Sistema
1. El usuario decide visualizar las coordenadas x,y,z de la zona de estudio en la aplicación.	2. El sistema solicita el archivo plano que contiene las coordenadas x,y,z de la zona de estudio.
	3. El sistema lee las coordenadas x,y,z y con éstas crea una red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay para realizar la visualización gráfica del modelo digital del terreno.
4. El usuario visualiza gráficamente el modelo digital del terreno.	
DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO	
Este diagrama muestra todo el proceso necesario que realiza el actor Usuario para ejecutar el caso de uso Visualizar modelo digital del terreno.	



MODELO CONCEPTUAL DEL CASO DE USO

En el modelo conceptual, se destacan los conceptos más importantes para el caso de uso Visualizar modelo digital del terreno.



A.1.4.2 Diseño

FORMATO CASO DE USO: VISUALIZAR MODELO DIGITAL DEL TERRENO

Actores

Usuario (Iniciador)

Este caso de uso comienza cuando el usuario realiza mediante la aplicación la visualización de las coordenadas del modelo digital del terreno de la zona de estudio dando clic en la opción Archivo de texto del menú Archivo. El sistema solicita al usuario el archivo que contiene las coordenadas x,y,z de la zona de estudio para su respectiva visualización.

Este caso de uso finaliza cuando el sistema despliega la visualización del modelo digital del terreno mediante la red irregular de triángulos que cumple la condición de Delaunay, o el usuario abandona el proceso o cierra la aplicación.

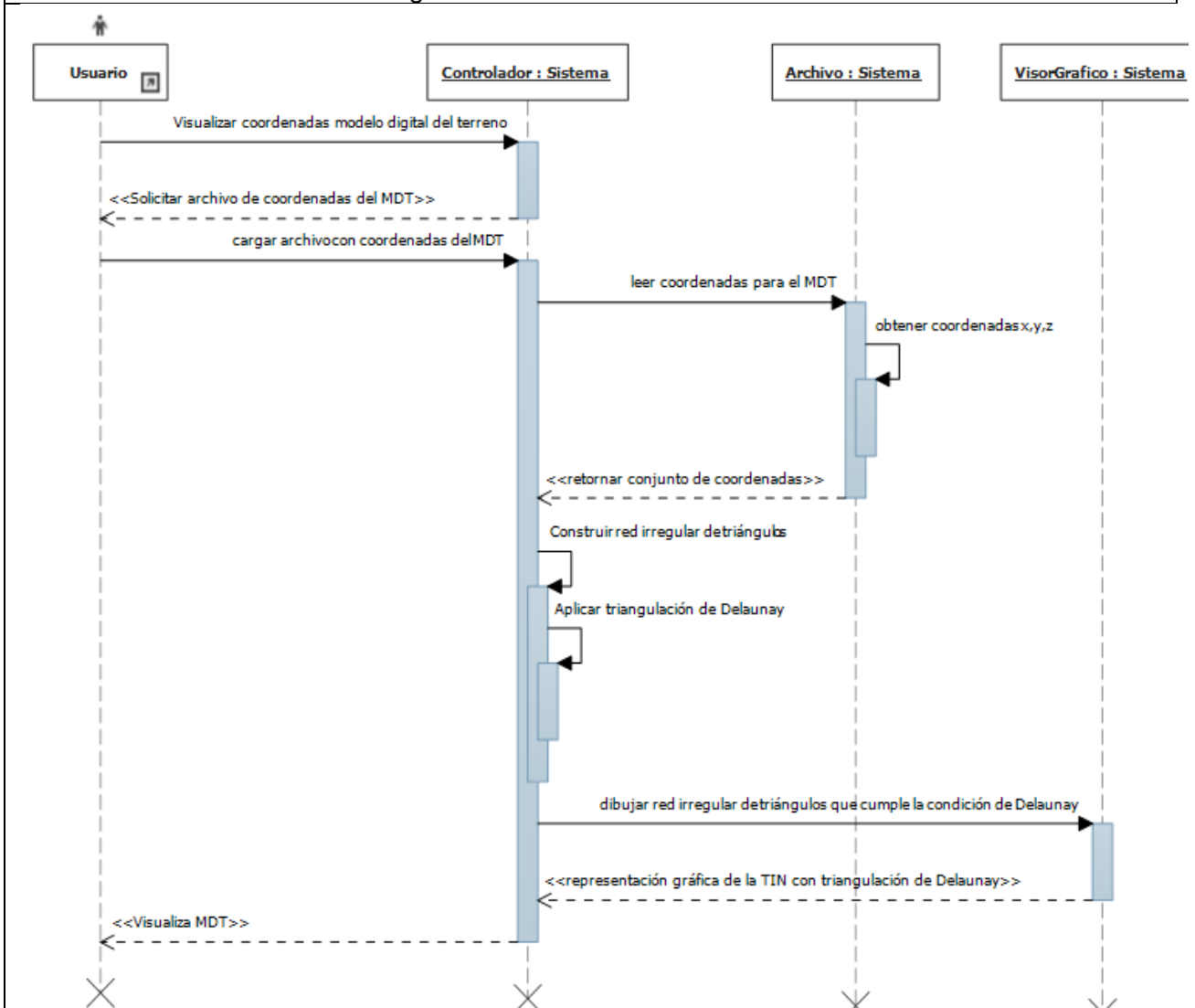
Acción del Actor

Respuesta del Sistema

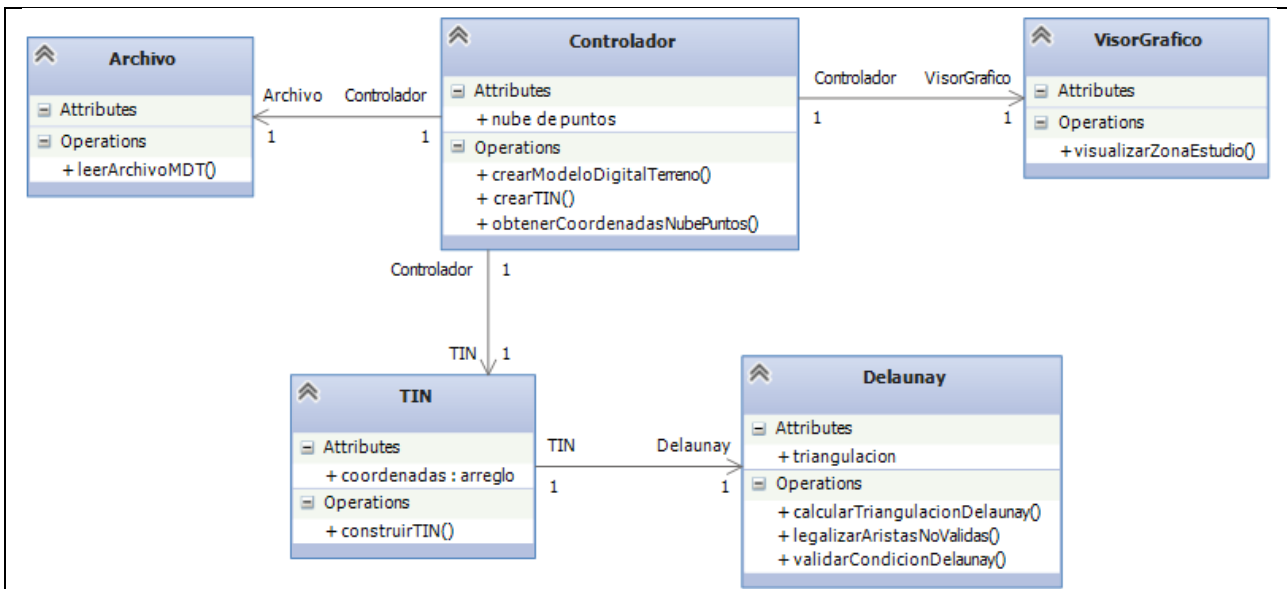
1. El usuario decide visualizar las coordenadas x,y,z de la zona de estudio en la aplicación, para lo cual carga el archivo con las coordenadas a través de la opción Archivo de texto del menú Archivo.	2. El sistema solicita el archivo plano que contiene las coordenadas x,y,z de la zona de estudio.
	3. El sistema lee las coordenadas x,y,z y con éstas crea una red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay para realizar la visualización gráfica del modelo digital del terreno.
4. El usuario visualiza gráficamente el modelo digital del terreno.	

CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO

El usuario hace clic sobre la opción Archivo de texto del menú Vista, el sistema solicita el archivo de texto que contiene las coordenadas del modelo digital de terreno y procede a construir una red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay, a partir de ésta tareas se realiza la visualización gráfica.



CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE CLASES DEL CASO DE USO



En la aplicación la clase Controlador se encarga de administrar las peticiones que realiza el usuario, delegarlo a la clase encargada, por ejemplo, delegar a la clase Archivo la lectura de las coordenadas del MDT, también delegar al VisorGrafico la tarea de realizar la representación gráfica del MDT a ser presentada al usuario.

La clase TIN se encarga a su vez de tareas asociadas a la lógica de negocio, como lo es: la construcción de la red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay, para lo cual se apoya en la clase Delaunay, la cual recorre la nube de puntos, aplica el algoritmo para la triangulación de Delaunay, legaliza aristas en el caso que éstas no sean válidas, para finalmente armar la TIN y utilizar dicha información para la representación visual del MDT.

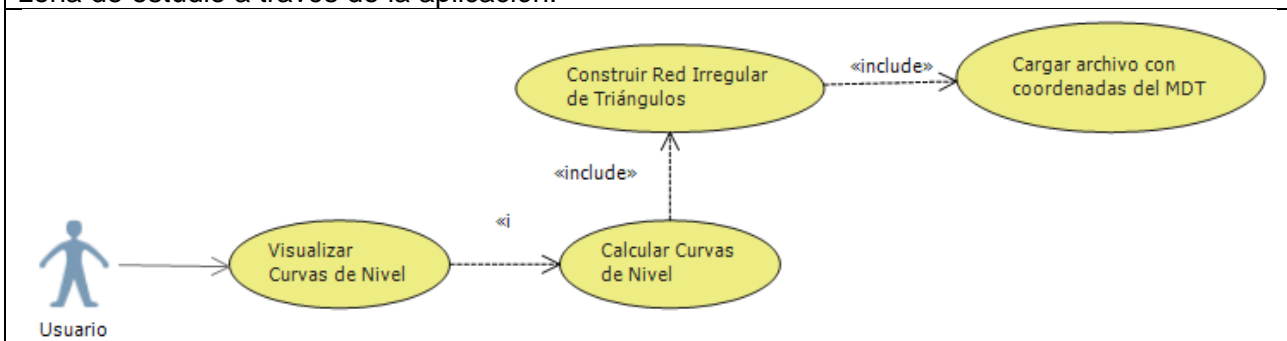
A.1.5 Caso de uso: Visualizar curvas de nivel

A.1.5.1 Análisis

El diagrama de caso de uso planteado a continuación, presenta la gestión de toda la información asociada al momento de visualizar las curvas de nivel asociadas a la zona de estudio.

DIAGRAMA DEL CASO DE USO: VISUALIZAR CURVAS DE NIVEL

En este diagrama se encuentra el actor Usuario, quien desea visualizar las curvas de nivel de la zona de estudio a través de la aplicación.



A continuación, se analizan cada una de las operaciones que conforman el caso de uso: Visualizar curvas de nivel, mostrado en el diagrama anterior.

FORMATO CASO DE USO: VISUALIZAR CURVAS DE NIVEL

Actores

- ♦ Usuario (Iniciador)

Este caso de uso comienza cuando el usuario realiza la visualización de las curvas de nivel de la zona de estudio. El usuario puede utilizar la configuración por defecto para la creación de las curvas de nivel o definir una configuración según su necesidad.

Este caso de uso finaliza cuando el sistema despliega la visualización de las curvas de nivel, o el usuario abandona el proceso o cierra la aplicación.

Acción del Actor

1. El usuario decide visualizar las curvas de nivel de la zona de estudio en la aplicación.

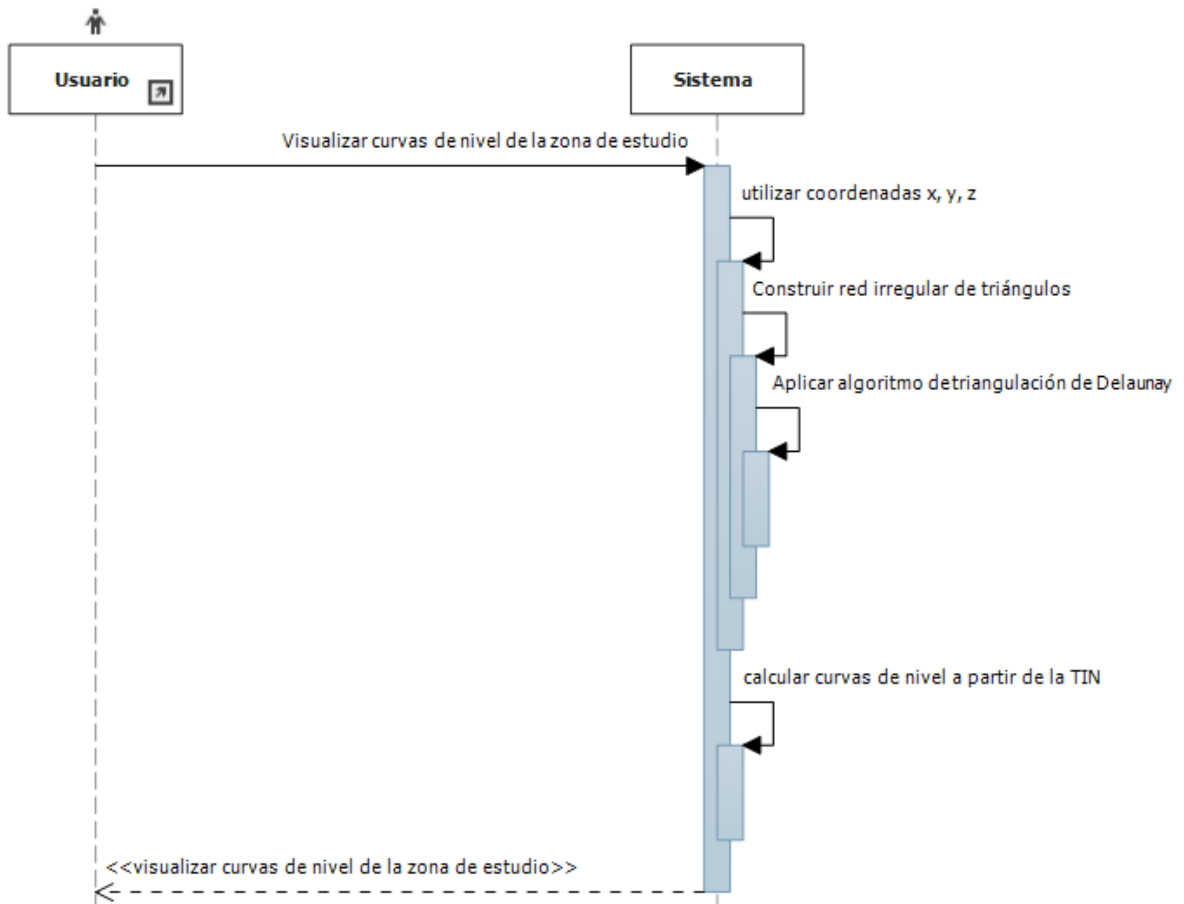
Respuesta del Sistema

2. El sistema valida previamente que se haya cargado la información asociada al modelo digital del terreno de la zona de estudio, para poder construir la red irregular de triángulos que cumple la condición de la triangulación de Delaunay y con base en la TIN creada, calcular las curvas de nivel de acuerdo al intervalo de separación indicado.

3. El usuario visualiza gráficamente las curvas de nivel asociadas a la zona de estudio según el intervalo indicado.

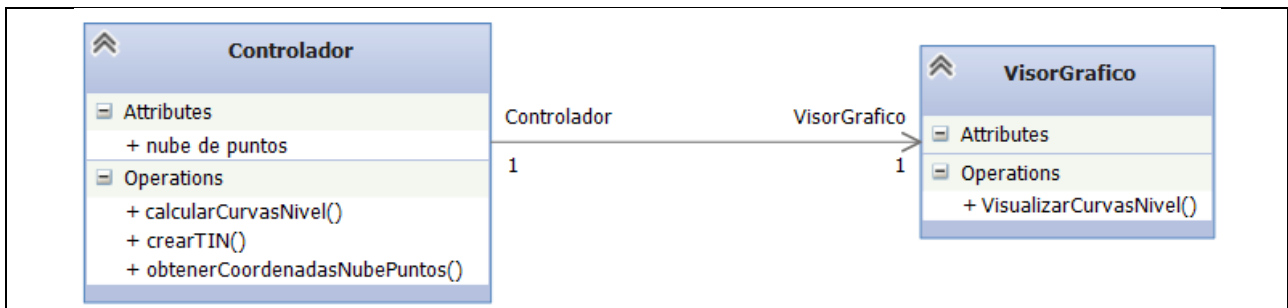
DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO

Este diagrama muestra todo el proceso necesario que realiza el actor Usuario para ejecutar el caso de uso Visualizar curvas de nivel.



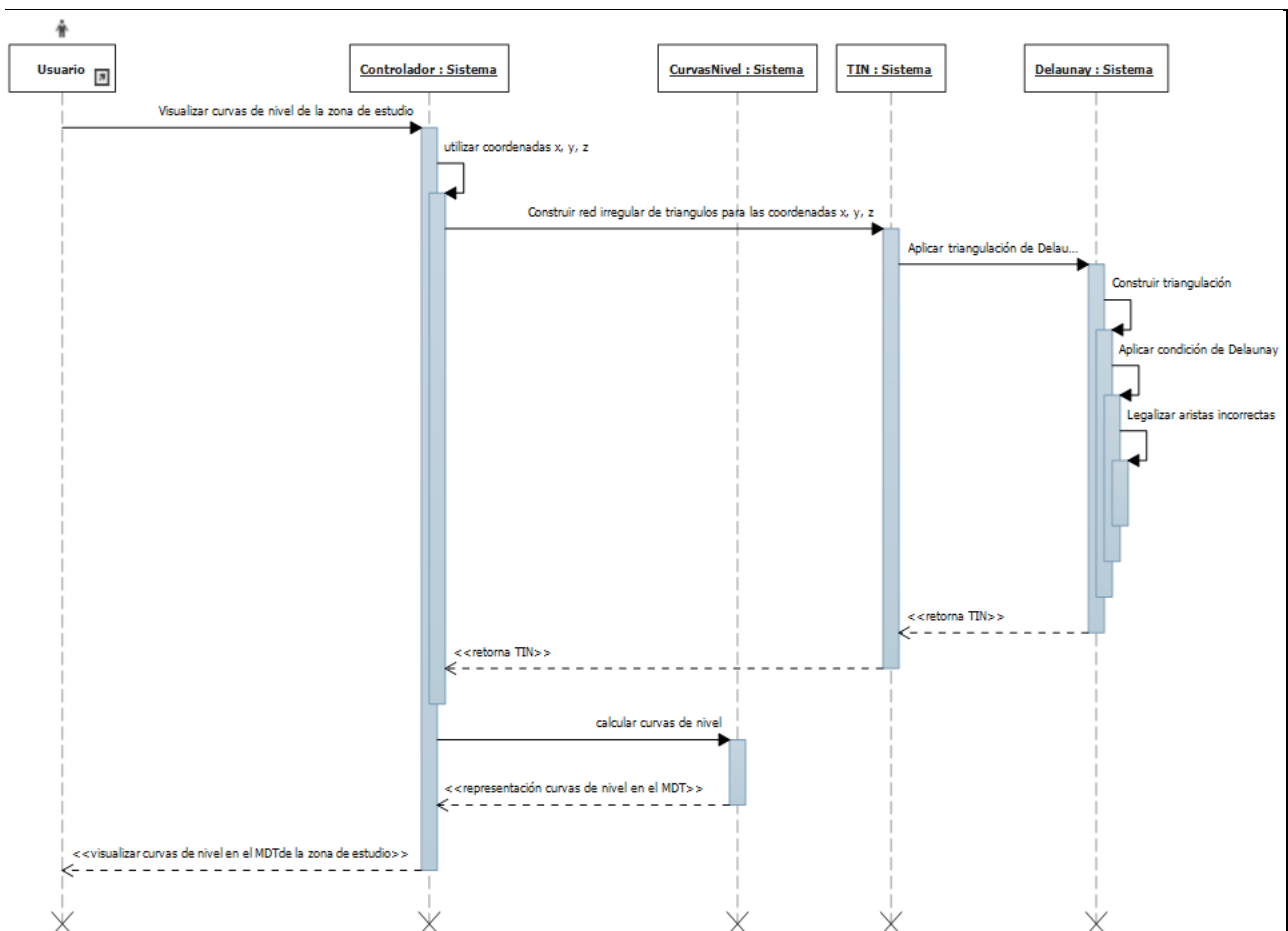
MODELO CONCEPTUAL DEL CASO DE USO

En el modelo conceptual, se destacan los conceptos más importantes para el caso de uso Visualizar curvas de nivel.

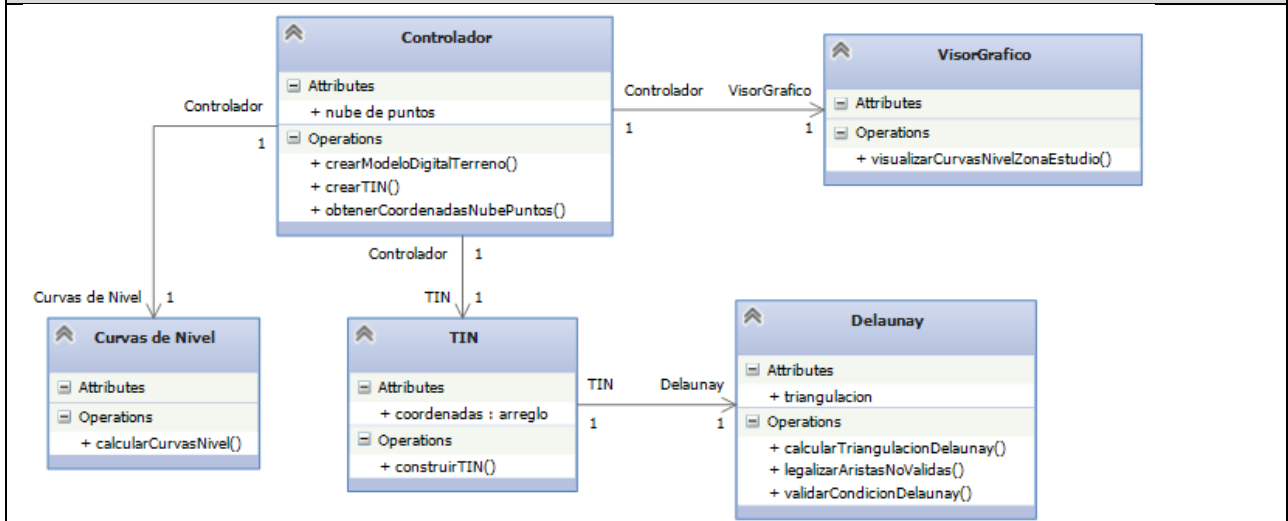


A.1.5.2 Diseño

FORMATO CASO DE USO: VISUALIZAR CURVAS DE NIVEL	
Actores	
Usuario (Iniciador)	
Este caso de uso comienza cuando el usuario realiza la visualización de las curvas de nivel de la zona de estudio. El usuario puede utilizar la configuración por defecto para la creación de las curvas de nivel o definir una configuración según su necesidad. Este caso de uso finaliza cuando el sistema despliega la visualización de las curvas de nivel, o el usuario abandona el proceso o cierra la aplicación.	
Acción del Actor	Respuesta del Sistema
1. El usuario decide visualizar las curvas de nivel de la zona de estudio en la aplicación.	2. El sistema debe contar previamente con las coordenadas x,y,z asociadas a la zona de estudio, con esta información crea una red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay, sobre la TIN construida realiza los cálculos para la creación de las curvas de nivel de acuerdo al intervalo establecido.
	3. El sistema despliega la visualización de las curvas de nivel según la configuración definida por el usuario.
4. El usuario visualiza gráficamente las curvas de nivel.	
CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO	
El usuario hace clic sobre la opción Curvas de nivel del menú Vista, el sistema debe contar previamente con la información asociada a las coordenadas x,y,z de la zona de estudio, con éstos datos se construye una red irregular de triángulos que cumple la condición de Delaunay, sobre esta TIN se realizan los cálculos asociados a la construcción de las curvas de nivel, los cuales permiten la visualización gráfica de las curvas de nivel de la zona de estudio.	



CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE CLASES DEL CASO DE USO

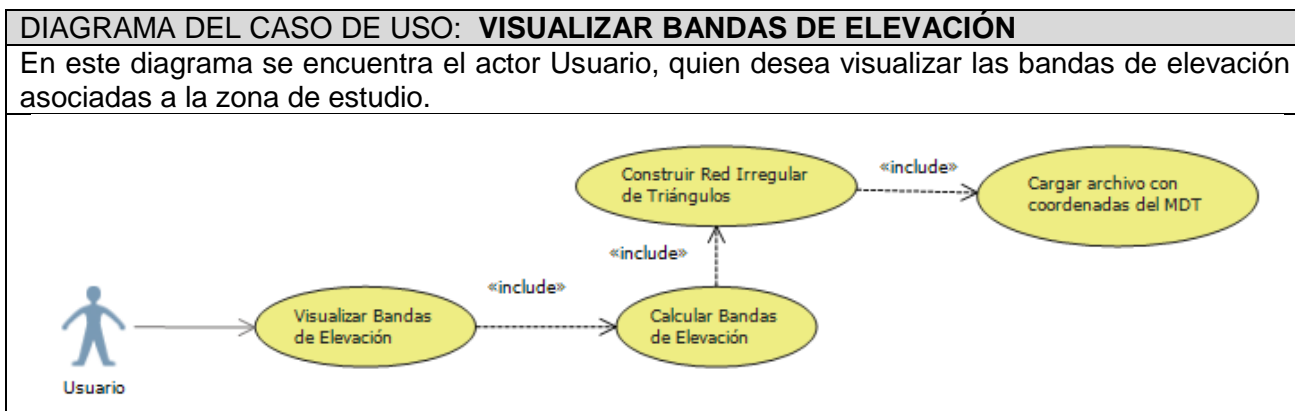


En la aplicación la clase Controlador se encarga de administrar las peticiones que realiza el usuario, delegarlo a la clase encargada, por ejemplo, La clase TIN se encarga a su vez de tareas asociadas a la lógica de negocio, como lo es: la construcción de la red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay, para lo cual se apoya en la clase Delaunay, la cual recorre la nube de puntos, aplica el algoritmo para la triangulación de Delaunay, legaliza aristas en el caso que éstas no sean válidas, para finalmente armar la TIN y utilizar dicha información para calcular las curvas de nivel interpolando sobre los triángulos según el intervalo configurado por el usuario para obtener la representación visual de las curvas de nivel en el MDT de la cual se encarga la clase VisorGrafico.

A.1.6 Caso de uso: Visualizar bandas de elevación

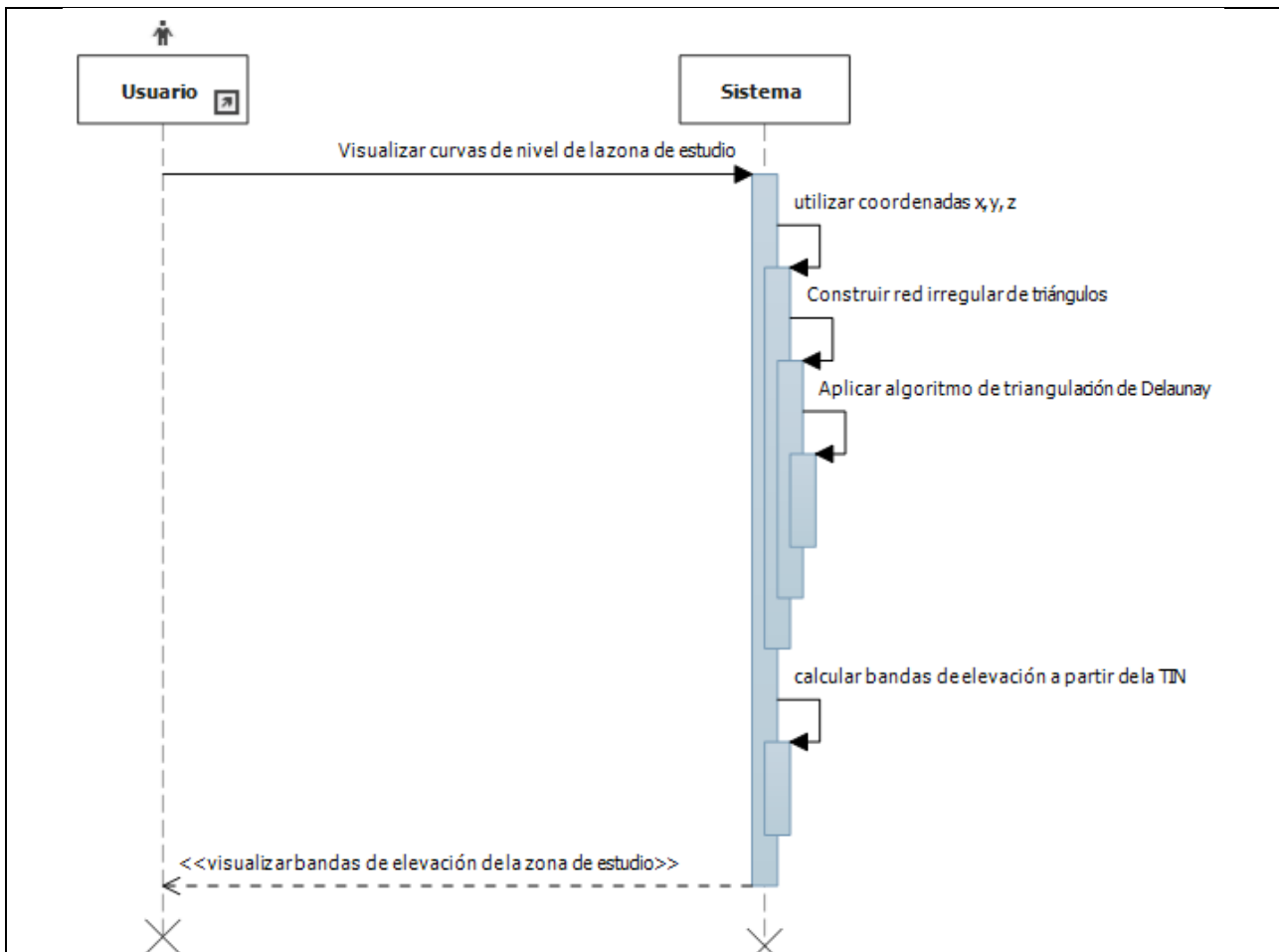
A.1.6.1 Análisis

El diagrama de caso de uso planteado a continuación, presenta la gestión de toda la información asociada al momento de visualizar las bandas de elevación.



A continuación, se analizan cada una de las operaciones que conforman el caso de uso: Visualizar bandas de elevación, mostrado en el diagrama anterior.

FORMATO CASO DE USO: VISUALIZAR BANDAS DE ELEVACIÓN	
Actores	
♦ Usuario (Iniciador)	
Este caso de uso comienza cuando el usuario realiza la visualización de las bandas de elevación de la zona de estudio. El usuario puede utilizar la configuración por defecto para la creación de las bandas de elevación o definir una configuración según su necesidad. Este caso de uso finaliza cuando el sistema despliega la visualización de las bandas de elevación, o el usuario abandona el proceso o cierra la aplicación.	
Acción del Actor	Acción del Actor
1. El usuario decide visualizar las bandas de elevación de la zona de estudio en la aplicación.	2. El sistema debe contar previamente con las coordenadas x,y,z asociadas a la zona de estudio, con esta información crea una red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay, sobre la TIN construida realiza los cálculos para la creación de las bandas de elevación de acuerdo con la configuración establecida.
	3. El sistema despliega la visualización de las bandas de elevación según la configuración definida por el usuario.
4. El usuario visualiza gráficamente las bandas de elevación.	
DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO	
Este diagrama muestra todo el proceso necesario que realiza el actor Usuario para ejecutar el caso de uso Visualizar bandas de elevación.	



MODELO CONCEPTUAL DEL CASO DE USO

En el modelo conceptual, se destacan los conceptos más importantes para el caso de uso Visualizar bandas de elevación.



A.1.6.2 Diseño

FORMATO CASO DE USO: VISUALIZAR BANDAS DE ELEVACIÓN

Actores

Usuario (Iniciador)

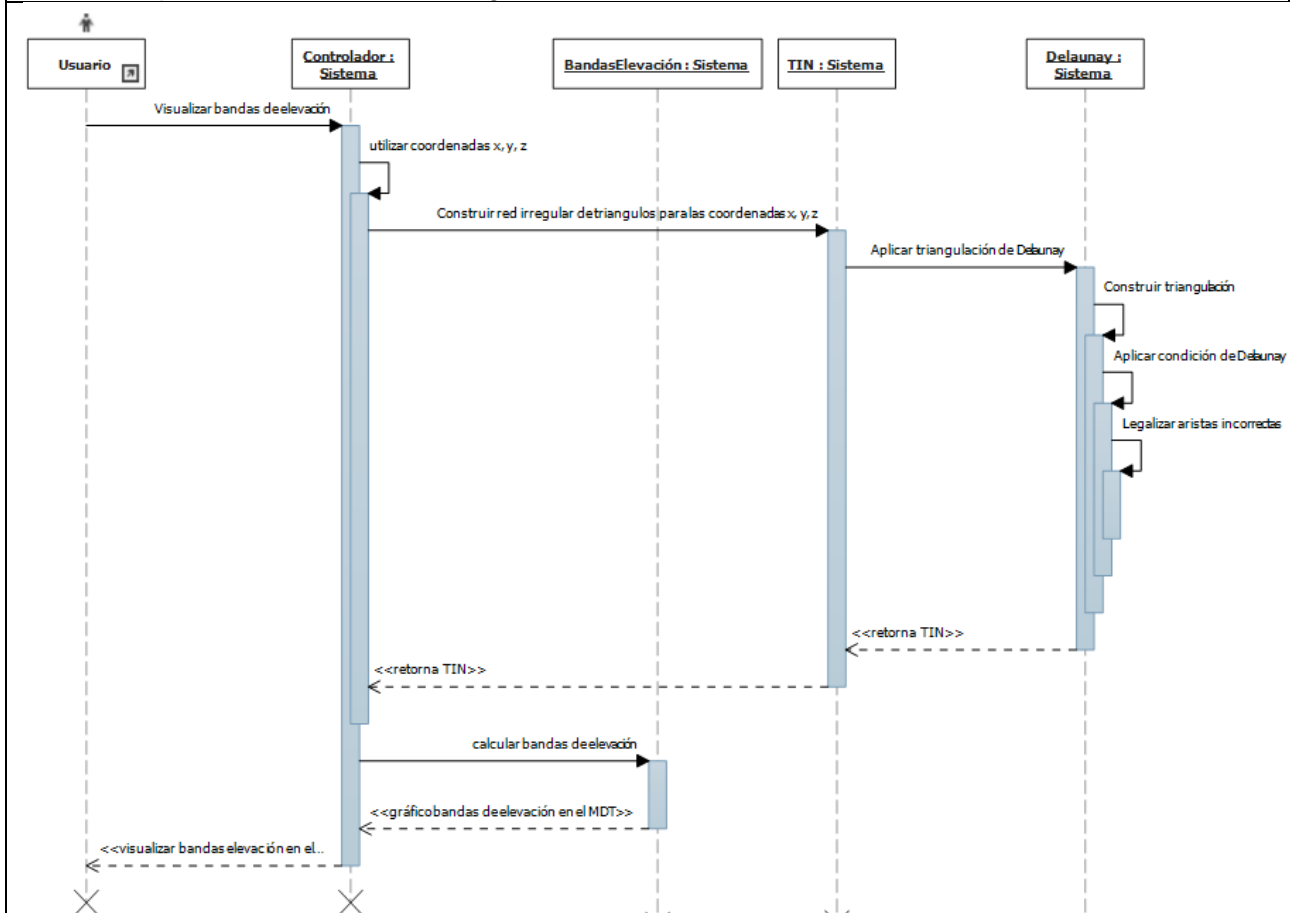
Este caso de uso comienza cuando el usuario realiza la visualización de las bandas de elevación de la zona de estudio. El usuario puede utilizar la configuración por defecto para la creación de las bandas de elevación o definir una configuración según su necesidad.

Este caso de uso finaliza cuando el sistema despliega la visualización de las bandas de elevación, o el usuario abandona el proceso o cierra la aplicación.

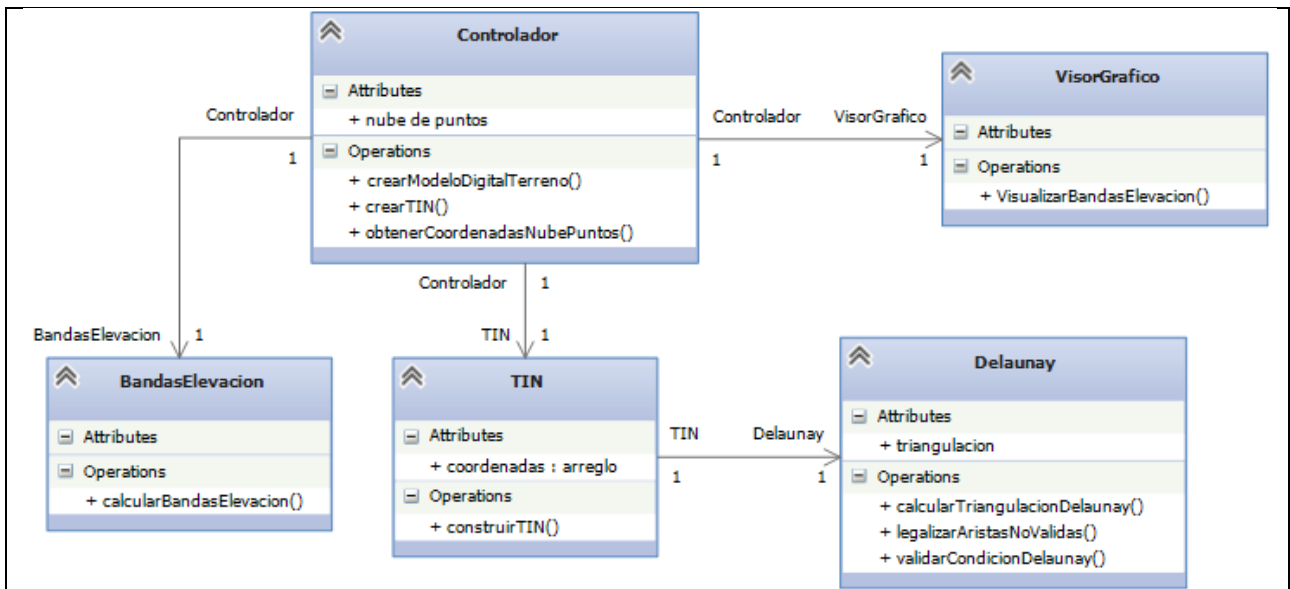
Acción del Actor	Respuesta del Sistema
1. El usuario decide visualizar las bandas de elevación de la zona de estudio en la aplicación.	2. El sistema debe contar previamente con las coordenadas x,y,z asociadas a la zona de estudio, con esta información crea una red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay, sobre la TIN construida realiza los cálculos para la creación de las bandas de elevación de acuerdo al intervalo establecido.
	3. El sistema despliega la visualización de las bandas de elevación según la configuración definida por el usuario.
4. El usuario visualiza gráficamente las bandas de elevación.	

CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO

El usuario hace clic sobre la opción Bandas de elevación del menú Vista, el sistema debe contar previamente con la información asociada a las coordenadas x,y,z de la zona de estudio, con éstos datos se construye una red irregular de triángulos que cumple la condición de Delaunay, sobre esta TIN se realizan los cálculos asociados a la construcción de las bandas de elevación, los cuales permiten la visualización gráfica de las bandas de elevación de la zona de estudio.



CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE CLASES DEL CASO DE USO



En la aplicación la clase Controlador se encarga de administrar las peticiones que realiza el usuario, delegarlo a la clase encargada, por ejemplo, La clase TIN se encarga a su vez de tareas asociadas a la lógica de negocio, como lo es: la construcción de la red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay, para lo cual se apoya en la clase Delaunay, la cual recorre la nube de puntos, aplica el algoritmo para la triangulación de Delaunay, legaliza aristas en el caso que éstas no sean válidas, para finalmente armar la TIN y utilizar dicha información para calcular las bandas de elevación sobre los triángulos según el número de bandas configurado por el usuario para obtener la representación visual de las bandas de elevación en el MDT de la cual se encarga la clase VisorGrafico.

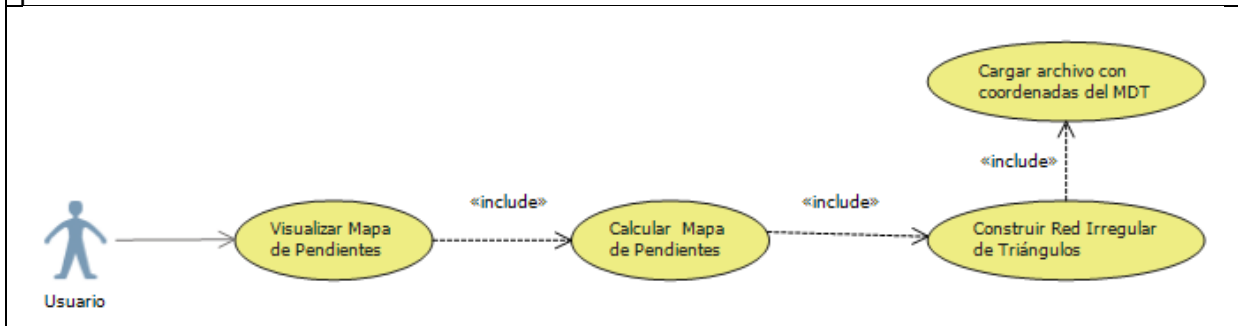
A.1.8 Caso de uso: Visualizar mapa de pendientes

A.1.8.1 Análisis

El diagrama de caso de uso planteado a continuación, presenta la gestión de toda la información asociada al momento de visualizar el mapa de pendientes.

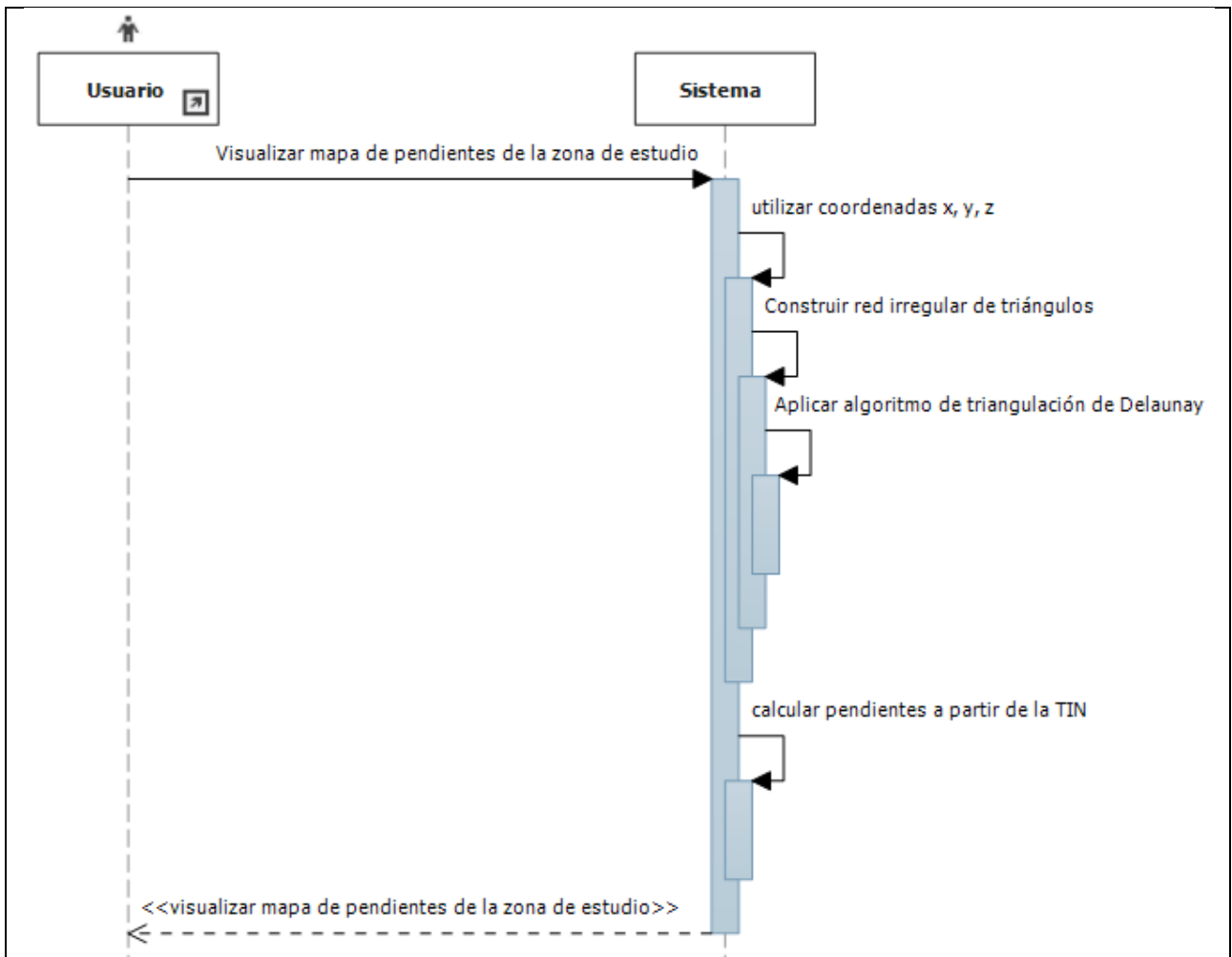
DIAGRAMA DEL CASO DE USO: VISUALIZAR MAPA DE PENDIENTES

En este diagrama se encuentra el actor Usuario, quien desea visualizar el mapa de pendientes asociadas a la zona de estudio.



A continuación, se analizan cada una de las operaciones que conforman el caso de uso: Visualizar mapa de pendientes, mostrado en el diagrama anterior.

FORMATO CASO DE USO: VISUALIZAR MAPA DE PENDIENTES	
Actores	
♦ Usuario (Iniciador)	
Este caso de uso comienza cuando el usuario realiza la visualización del mapa de pendientes de la zona de estudio. El usuario puede utilizar la configuración por defecto para la creación del mapa de pendientes o definir una configuración según su necesidad. Este caso de uso finaliza cuando el sistema despliega la visualización del mapa de pendientes, o el usuario abandona el proceso o cierra la aplicación.	
Acción del Actor	Acción del Actor
1. El usuario decide visualizar el mapa de pendientes de la zona de estudio en la aplicación.	2. El sistema debe contar previamente con las coordenadas x,y,z asociadas a la zona de estudio, con esta información crea una red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay, sobre la TIN construida realiza los cálculos para la creación del mapa de pendientes de acuerdo con la configuración establecida.
	3. El sistema despliega la visualización del mapa de pendientes según la configuración definida por el usuario.
4. El usuario visualiza gráficamente el mapa de pendientes.	
DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO	
Este diagrama muestra todo el proceso necesario que realiza el actor Usuario para ejecutar el caso de uso Visualizar mapa de pendientes.	



MODELO CONCEPTUAL DEL CASO DE USO

En el modelo conceptual, se destacan los conceptos más importantes para el caso de uso Visualizar mapa de pendientes.



A.1.6.2 Diseño

FORMATO CASO DE USO: VISUALIZAR MAPA DE PENDIENTES

Actores

Usuario (Iniciador)

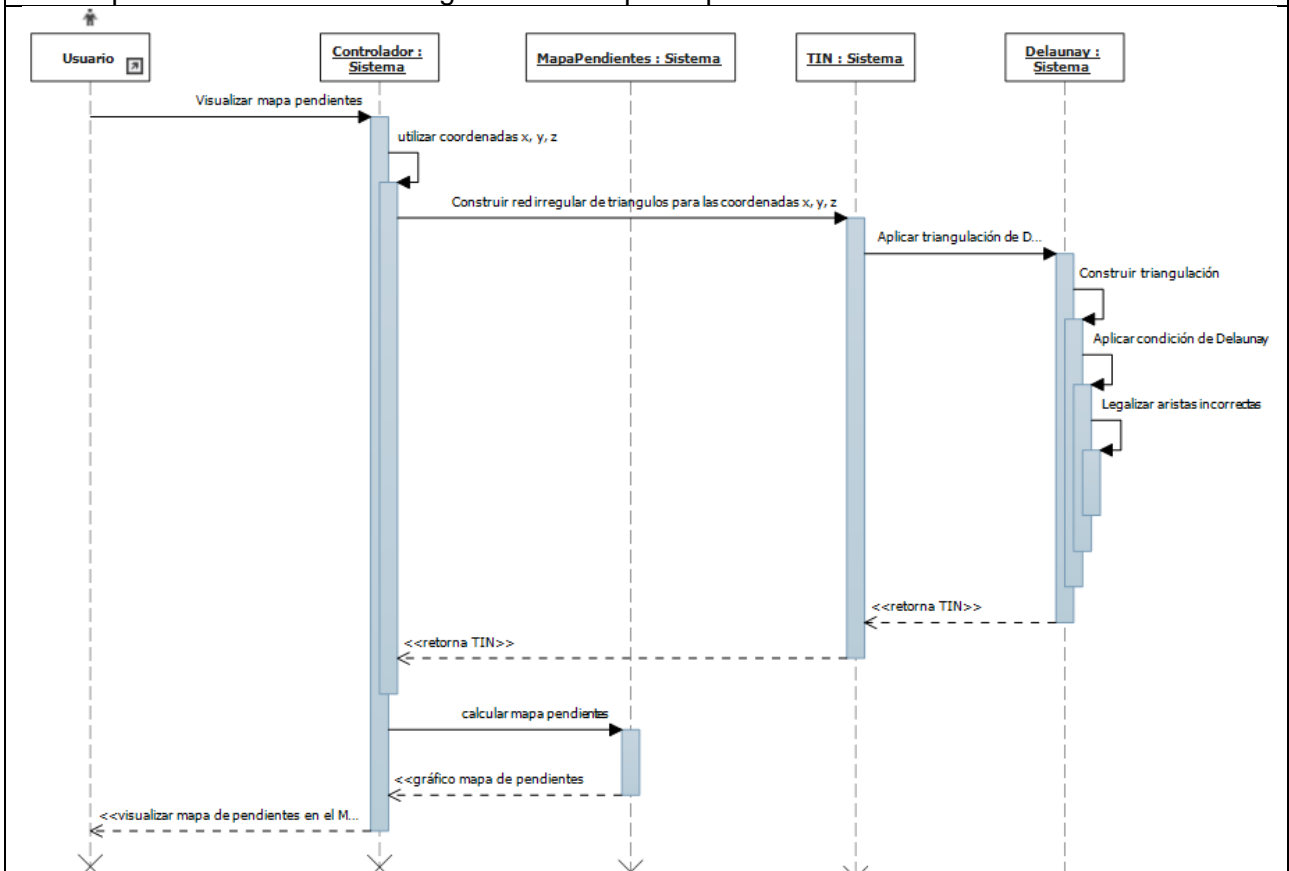
Este caso de uso comienza cuando el usuario realiza la visualización del mapa de pendientes de la zona de estudio. El usuario puede utilizar la configuración por defecto para la creación del mapa de pendientes o definir una configuración según su necesidad.

Este caso de uso finaliza cuando el sistema despliega la visualización del mapa de pendientes, o el usuario abandona el proceso o cierra la aplicación.

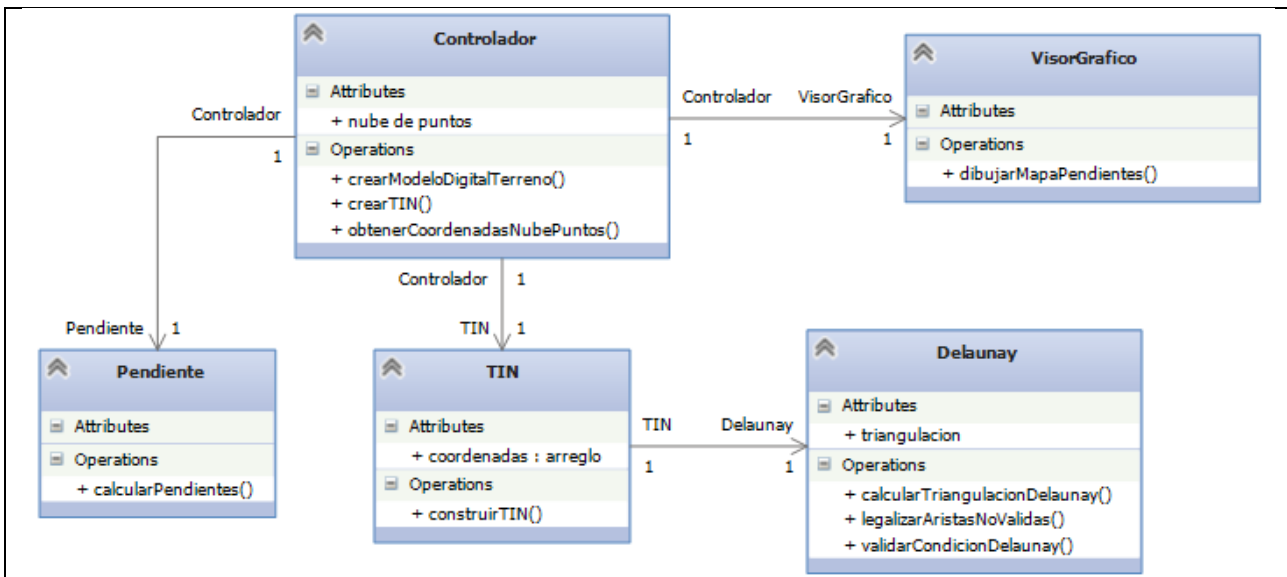
Acción del Actor	Respuesta del Sistema
1. El usuario decide visualizar el mapa de pendientes de la zona de estudio en la aplicación.	2. El sistema debe contar previamente con las coordenadas x,y,z asociadas a la zona de estudio, con esta información crea una red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay, sobre la TIN construida realiza los cálculos para la creación del mapa de pendientes de acuerdo con la configuración establecida.
	3. El sistema despliega la visualización del mapa de pendientes según la configuración definida por el usuario.
4. El usuario visualiza gráficamente el mapa de pendientes.	

CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO

El usuario hace clic sobre la opción Mapa de pendientes del menú Vista, el sistema debe contar previamente con la información asociada a las coordenadas x,y,z de la zona de estudio, con éstos datos se construye una red irregular de triángulos que cumple la condición de Delaunay, sobre esta TIN se realizan los cálculos asociados a la construcción del mapa de pendientes, los cuales permiten la visualización gráfica del mapa de pendientes de la zona de estudio.



CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE CLASES DEL CASO DE USO



En la aplicación la clase Controlador se encarga de administrar las peticiones que realiza el usuario, delegarlo a la clase encargada, por ejemplo, La clase TIN se encarga a su vez de tareas asociadas a la lógica de negocio, como lo es: la construcción de la red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay, para lo cual se apoya en la clase Delaunay, la cual recorre la nube de puntos, aplica el algoritmo para la triangulación de Delaunay, legaliza aristas en el caso que éstas no sean válidas, para finalmente armar la TIN y utilizar dicha información para calcular el mapa de pendientes sobre los triángulos según el tipo de pendientes a utilizar configurado por el usuario para obtener la representación visual del mapa de pendientes en el MDT de la cual se encarga la clase VisorGrafico.

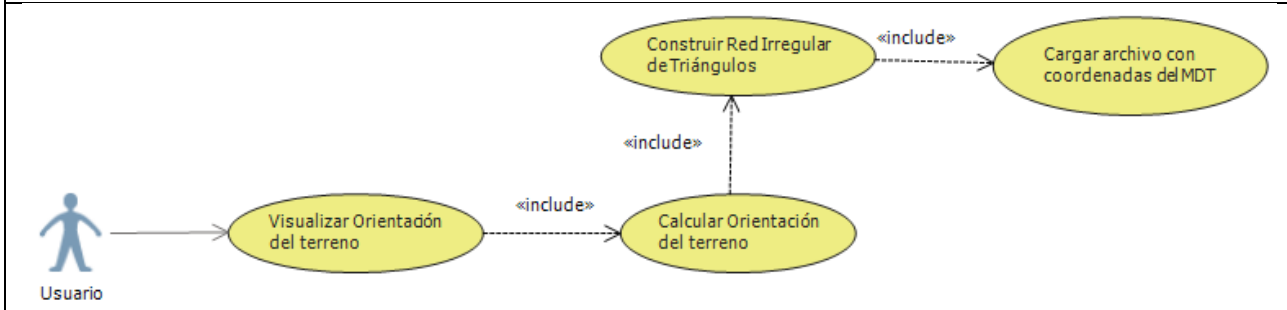
A.1.9 Caso de uso: Visualizar orientación del terreno

A.1.9.1 Análisis

El diagrama de caso de uso planteado a continuación, presenta la gestión de toda la información asociada al momento de visualizar la orientación del terreno.

DIAGRAMA DEL CASO DE USO: VISUALIZAR ORIENTACIÓN DEL TERRENO

En este diagrama se encuentra el actor Usuario, quien desea visualizar la orientación del terreno asociada a la zona de estudio.



A continuación, se analizan cada una de las operaciones que conforman el caso de uso: Visualizar orientación del terreno, mostrado en el diagrama anterior.

FORMATO CASO DE USO: VISUALIZAR ORIENTACIÓN DEL TERRENO

Actores

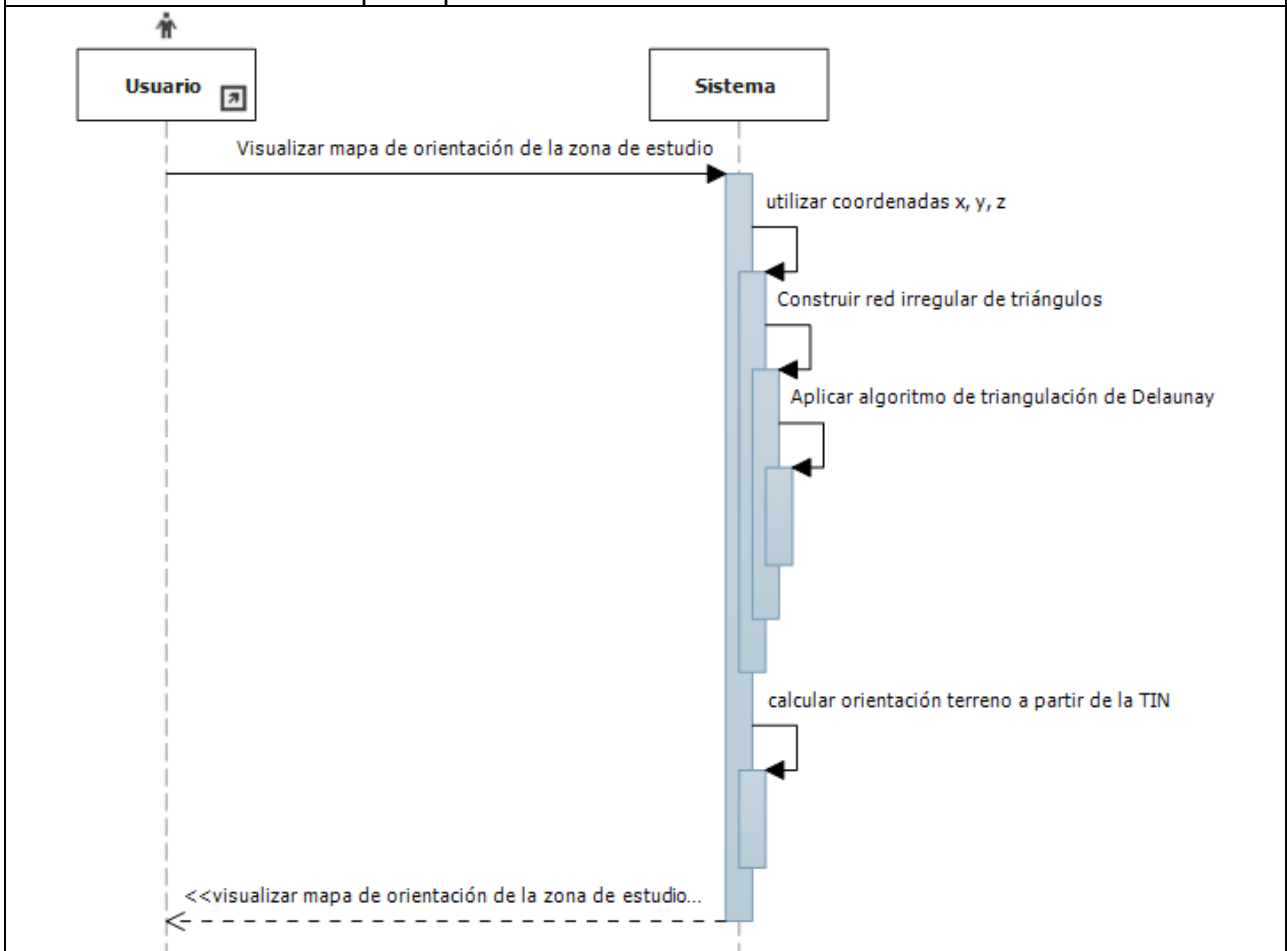
- Usuario (Iniciador)

Este caso de uso comienza cuando el usuario realiza la visualización del mapa de orientación del terreno de la zona de estudio. El usuario puede utilizar la configuración por defecto para la creación del mapa de orientación del terreno o definir una configuración según su necesidad. Este caso de uso finaliza cuando el sistema despliega la visualización del mapa de orientación del terreno, o el usuario abandona el proceso o cierra la aplicación.

Acción del Actor	Acción del Actor
1. El usuario decide visualizar el mapa de orientación del terreno de la zona de estudio en la aplicación.	2. El sistema debe contar previamente con las coordenadas x,y,z asociadas a la zona de estudio, con esta información crea una red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay, sobre la TIN construida se realiza los cálculos para la creación del mapa de orientación del terreno de acuerdo con la configuración establecida.
	3. El sistema despliega la visualización del mapa de orientación del terreno según la configuración definida por el usuario.
4. El usuario visualiza gráficamente el mapa de orientación del terreno.	

DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO

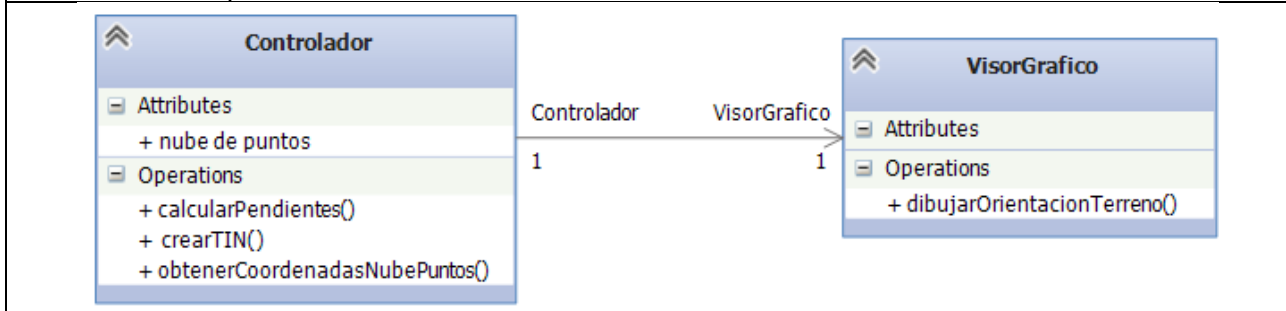
Este diagrama muestra todo el proceso necesario que realiza el actor Usuario para ejecutar el caso de uso Visualizar mapa de pendientes.



MODELO CONCEPTUAL DEL CASO DE USO

En el modelo conceptual, se destacan los conceptos más importantes para el caso de uso

Visualizar el mapa de orientación del terreno.



A.1.9.2 Diseño

FORMATO CASO DE USO: VISUALIZAR MAPA DE ORIENTACIÓN DEL TERRENO

Actores

Usuario (Iniciador)

Este caso de uso comienza cuando el usuario realiza la visualización del mapa de orientación del terreno de la zona de estudio. El usuario puede utilizar la configuración por defecto para la creación del mapa de orientación del terreno o definir una configuración según su necesidad. Este caso de uso finaliza cuando el sistema despliega la visualización del mapa de orientación del terreno, o el usuario abandona el proceso o cierra la aplicación.

Acción del Actor

Respuesta del Sistema

1. El usuario decide visualizar el mapa de orientación del terreno de la zona de estudio en la aplicación.

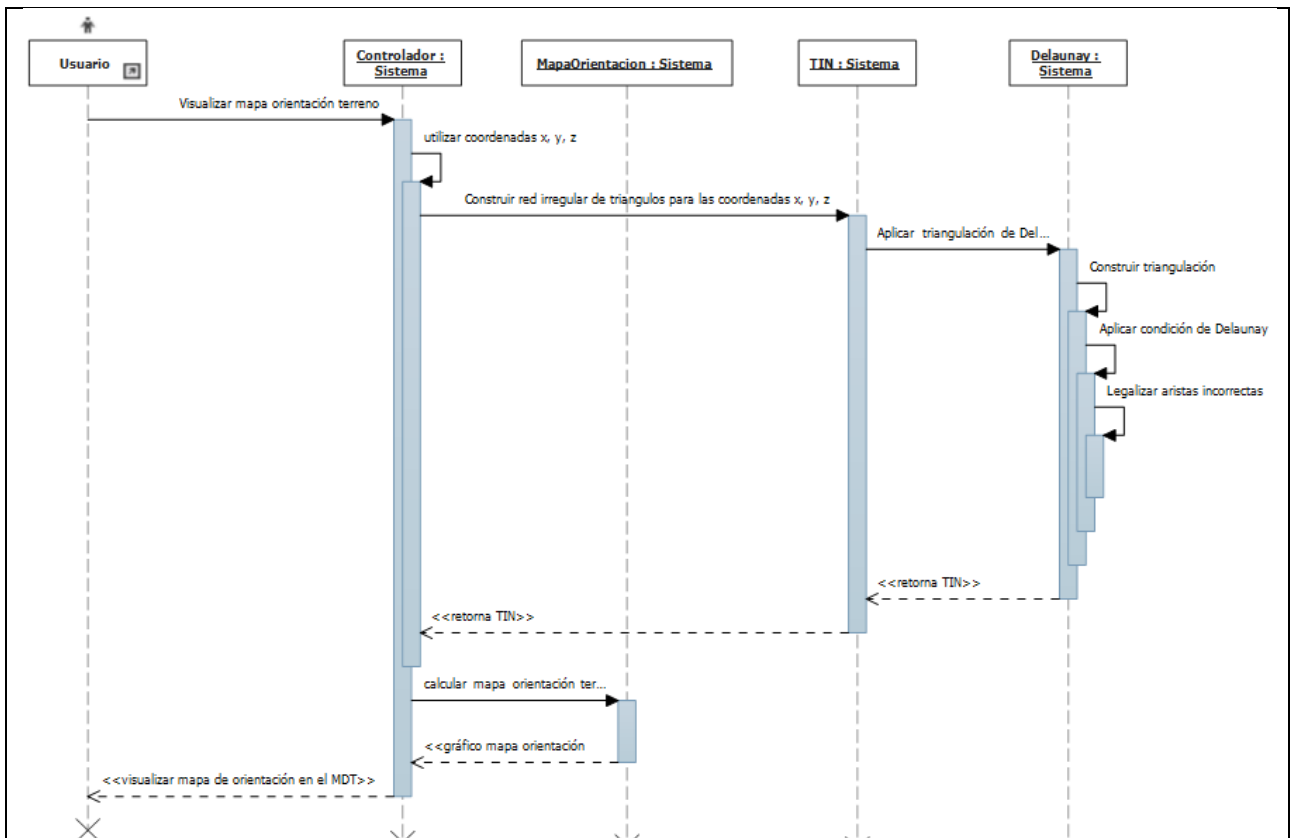
2. El sistema debe contar previamente con las coordenadas x,y,z asociadas a la zona de estudio, con esta información crea una red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay, sobre la TIN construida se realizan los cálculos para la creación del mapa de orientación del terreno de acuerdo con la configuración establecida.

3. El sistema despliega la visualización del mapa de orientación del terreno según la configuración definida por el usuario.

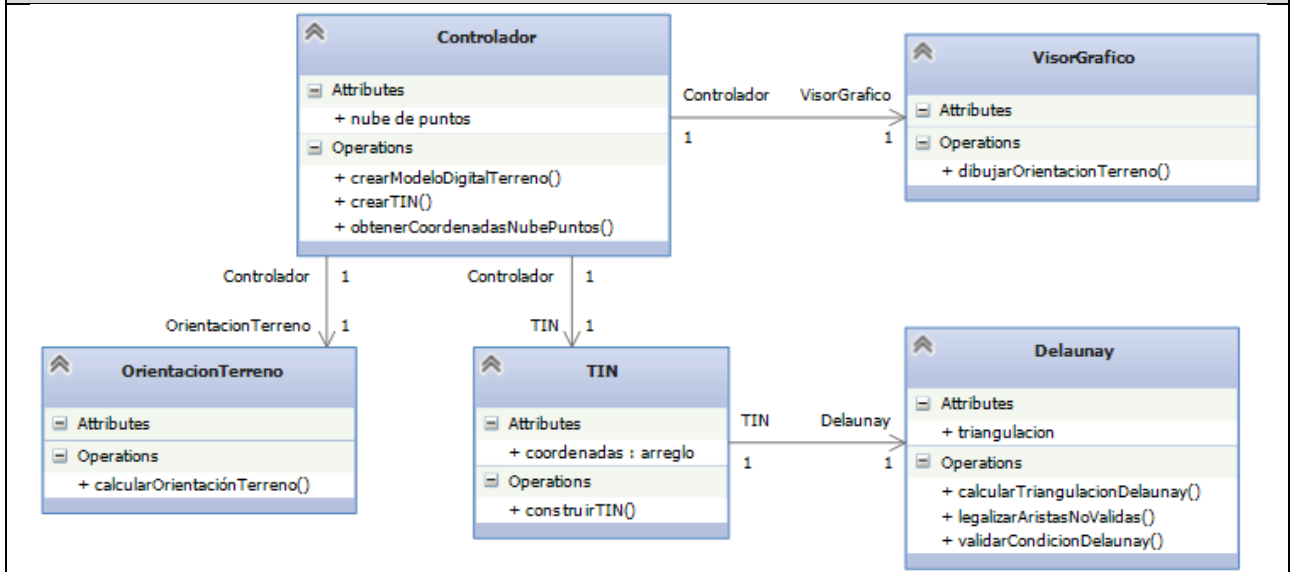
4. El usuario visualiza gráficamente el mapa de orientación del terreno.

CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO

El usuario hace clic sobre la opción Orientación Terreno del menú Vista, el sistema debe contar previamente con la información asociada a las coordenadas x,y,z de la zona de estudio, con éstos datos se construye una red irregular de triángulos que cumple la condición de Delaunay, sobre esta TIN se realizan los cálculos asociados a la construcción del mapa de orientación del terreno, los cuales permiten la visualización gráfica del mapa de orientación del terreno de la zona de estudio.



CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE CLASES DEL CASO DE USO

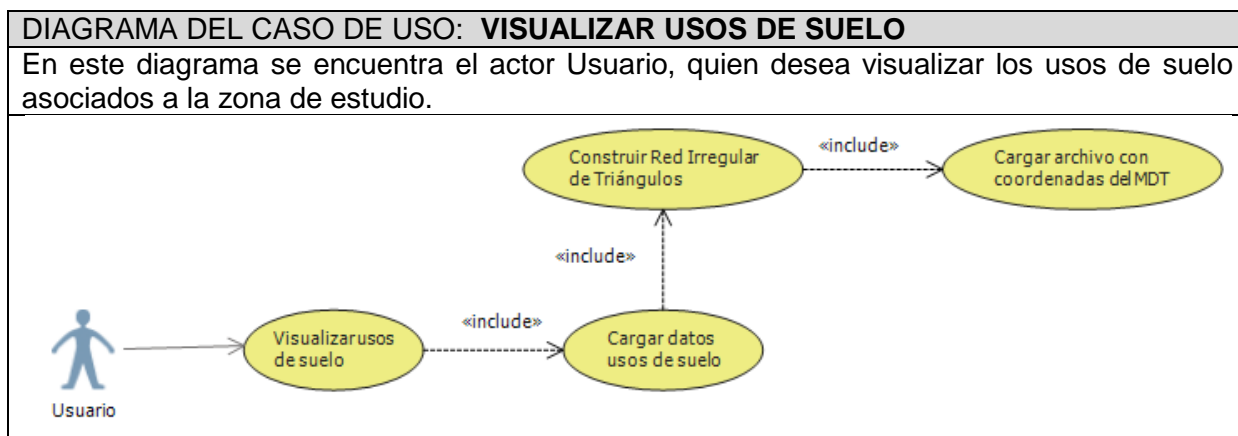


En la aplicación la clase Controlador se encarga de administrar las peticiones que realiza el usuario, delegarlo a la clase encargada, por ejemplo, La clase TIN se encarga a su vez de tareas asociadas a la lógica de negocio, como lo es: la construcción de la red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay, para lo cual se apoya en la clase Delaunay, la cual recorre la nube de puntos, aplica el algoritmo para la triangulación de Delaunay, legaliza aristas en el caso que éstas no sean válidas, para finalmente armar la TIN y utilizar dicha información para calcular el mapa de orientación sobre los triángulos según el tipo de orientación a utilizar configurado por el usuario para obtener la representación visual del mapa de orientación del terreno en el MDT de la cual se encarga la clase VisorGrafico.

A.1.10 Caso de uso: Visualizar usos de suelo

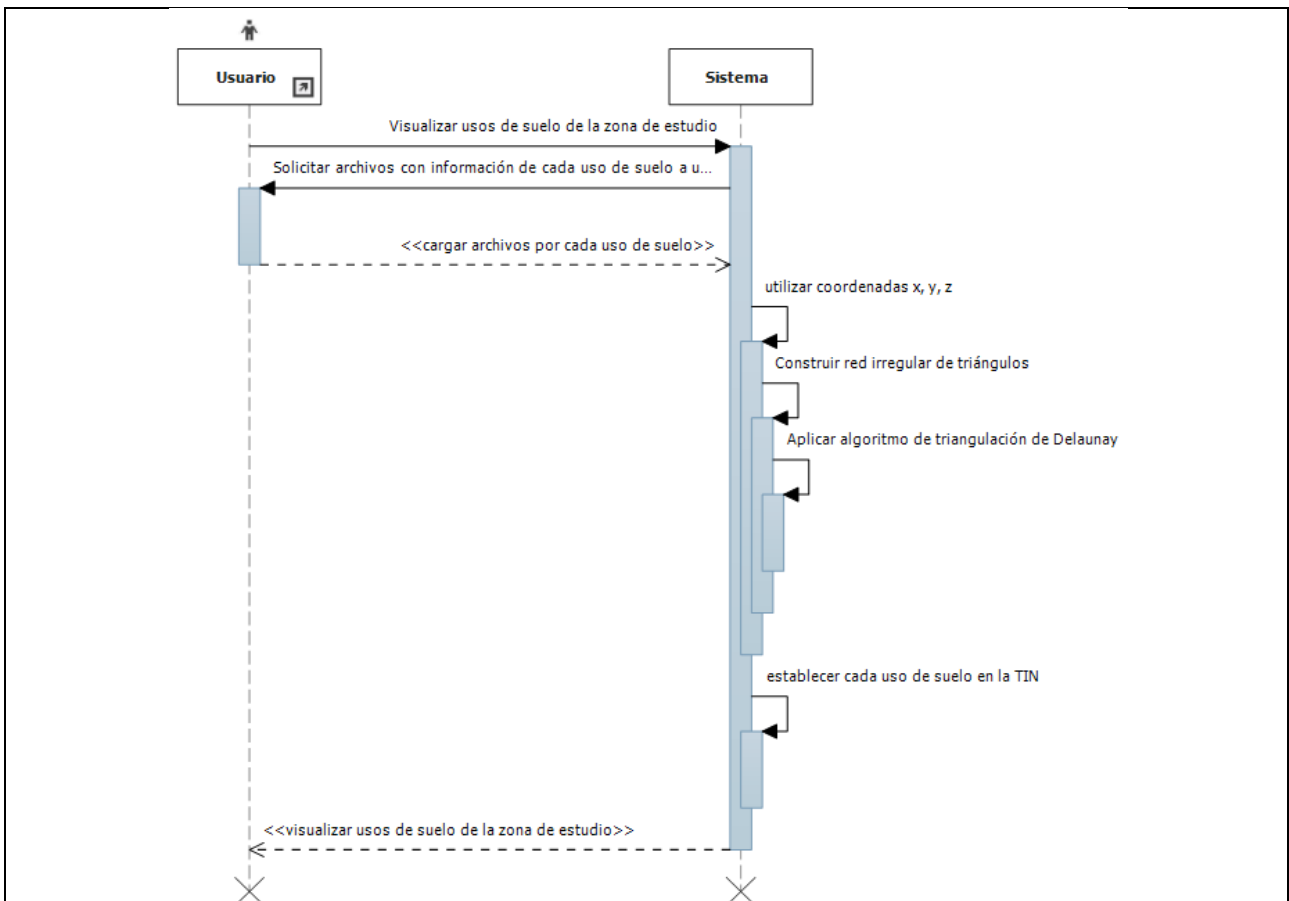
A.1.10.1 Análisis

El diagrama de caso de uso planteado a continuación, presenta la gestión de toda la información asociada al momento de carga la información asociada a los usos de suelo.



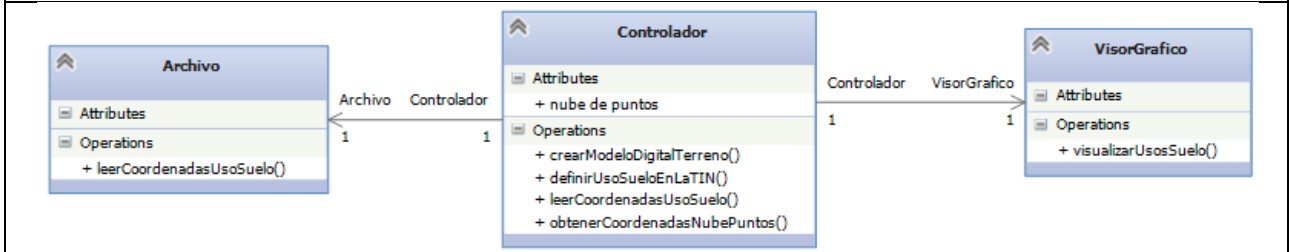
A continuación, se analizan cada una de las operaciones que conforman el caso de uso: Visualizar usos de suelo, mostrado en el diagrama anterior.

FORMATO CASO DE USO: VISUALIZAR USOS DE SUELO	
Actores	
♦ Usuario (Iniciador)	
Este caso de uso comienza cuando el usuario realiza la visualización de los usos de suelo de la zona de estudio. El usuario debe cargar los archivos con la información de las coordenadas asociadas a cada uso de suelo.	
Este caso de uso finaliza cuando el sistema despliega la visualización gráfica de los usos de suelo, o el usuario abandona el proceso o cierra la aplicación.	
Acción del Actor	Acción del Actor
1. El usuario decide visualizar los usos de suelo de la zona de estudio en la aplicación.	2. El sistema debe contar previamente con las coordenadas x,y,z asociadas a la zona de estudio, con esta información crea una red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay, sobre la TIN construida se realiza los cálculos para la lectura y visualización de los usos de suelo.
	3. El sistema solicita cada uno de los archivos que contiene la información de los usos de suelo a utilizar.
4. El usuario carga los archivos asociados a cada uso de suelo.	5. El sistema despliega la visualización de los usos de suelo de acuerdo con la información que provea el usuario.
6. El usuario visualiza gráficamente los usos de suelo del terreno.	
DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO	
Este diagrama muestra todo el proceso necesario que realiza el actor Usuario para ejecutar el caso de uso Visualizar usos del suelo.	



MODELO CONCEPTUAL DEL CASO DE USO

En el modelo conceptual, se destacan los conceptos más importantes para el caso de uso Visualizar los usos de suelo.



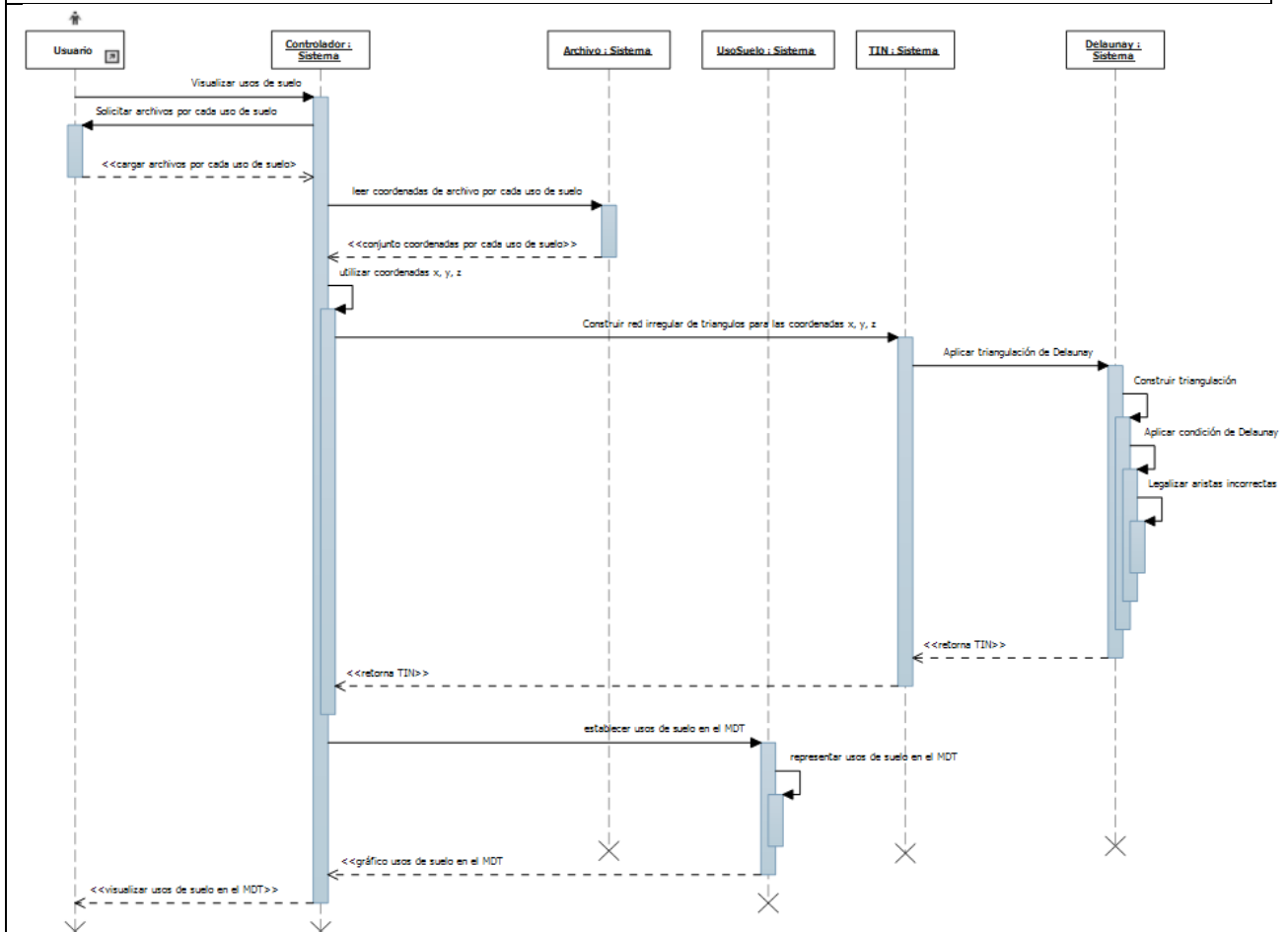
A.1.10.2 Diseño

FORMATO CASO DE USO: VISUALIZAR USOS DE SUELO	
Actores	
Usuario (Iniciador)	
Este caso de uso comienza cuando el usuario realiza la visualización de los usos de suelo de la zona de estudio. El usuario debe cargar los archivos con la información de las coordenadas asociadas a cada uso de suelo.	
Acción del Actor	Respuesta del Sistema
1. El usuario decide visualizar los usos de suelo de la zona de estudio en la aplicación.	2. El sistema solicita por cada uso de suelo, el o los archivos asociados que contiene las coordenadas x,y,z asociadas, con esta información se ubica sobre la red irregular de

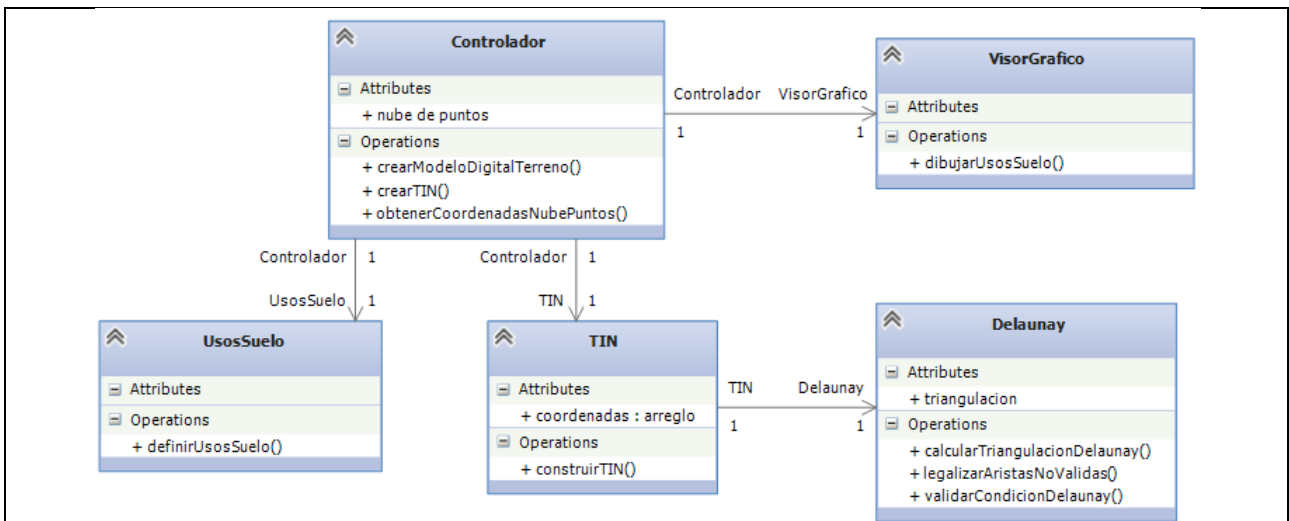
	triángulos que cumpla la condición de Delaunay, las coordenadas de cada uso de suelo para su respectiva definición y visualización.
	3. El sistema solicita cada uno de los archivos que contiene la información de los usos de suelo a utilizar.
4. El usuario carga los archivos asociados a cada uso de suelo.	5. El sistema despliega la visualización de los usos de suelo de acuerdo con la información que provea el usuario.
6. El usuario visualiza gráficamente los usos de suelo.	

CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO

El usuario hace clic sobre la opción Uso de suelo del menú Vista, el sistema solicita al usuario el archivo o archivos asociados a cada uso de suelo, también se debe contar previamente con la información asociada a las coordenadas x,y,z de la zona de estudio, con éstos datos se construye una red irregular de triángulos que cumple la condición de Delaunay, sobre esta TIN se realizan los cálculos asociados para la definición y visualización de los usos de suelo de la zona de estudio.



CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE CLASES DEL CASO DE USO



En la aplicación la clase Controlador se encarga de administrar las peticiones que realiza el usuario, delegarlo a la clase encargada, por ejemplo, La clase TIN se encarga a su vez de tareas asociadas a la lógica de negocio, como lo es: la construcción de la red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay, para lo cual se apoya en la clase Delaunay, la cual recorre la nube de puntos, aplica el algoritmo para la triangulación de Delaunay, legaliza aristas en el caso que éstas no sean válidas, para finalmente armar la TIN y utilizar dicha información para definir a través de calcular el mapa de orientación sobre los triángulos según el tipo de orientación a utilizar configurado por el usuario para obtener la representación visual del mapa de orientación del terreno en el MDT de la cual se encarga la clase VisorGrafico.

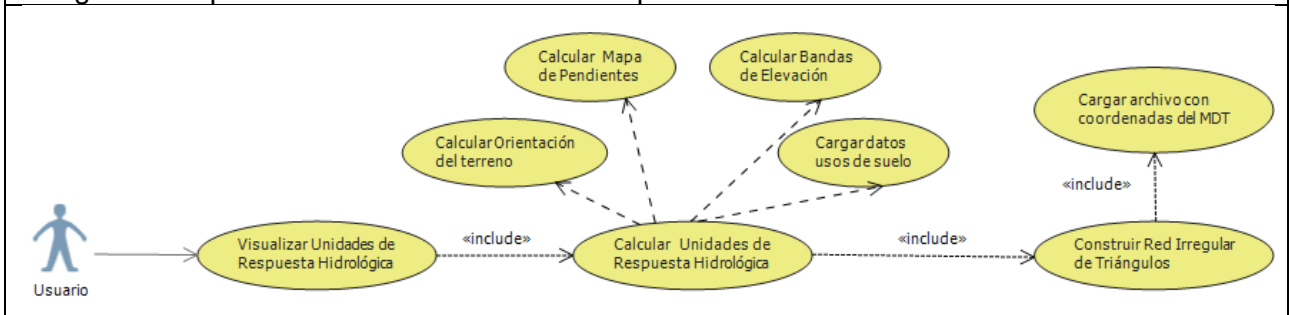
A.1.11 Caso de uso: Visualizar unidades de respuesta hidrológica

A.1.11.1 Análisis

El diagrama de caso de uso planteado a continuación, presenta la gestión de toda la información asociada a la visualización de las unidades de respuesta hidrológica.

DIAGRAMA DEL CASO DE USO: VISUALIZAR UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA

En este diagrama se encuentra el actor Usuario, quien desea cargar una ruta KML del río sobre Google Earth que está embebido dentro de la aplicación.



A continuación, se analizan cada una de las operaciones que conforman el caso de uso: Visualizar unidades de respuesta hidrológica, mostrado en el diagrama anterior.

FORMATO CASO DE USO: VISUALIZAR UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA

Actores

- ◆ Usuario (Iniciador)

Este caso de uso comienza cuando el usuario realiza la visualización de las unidades de respuesta hidrológica de acuerdo con las características comunes definidas por el usuario, es

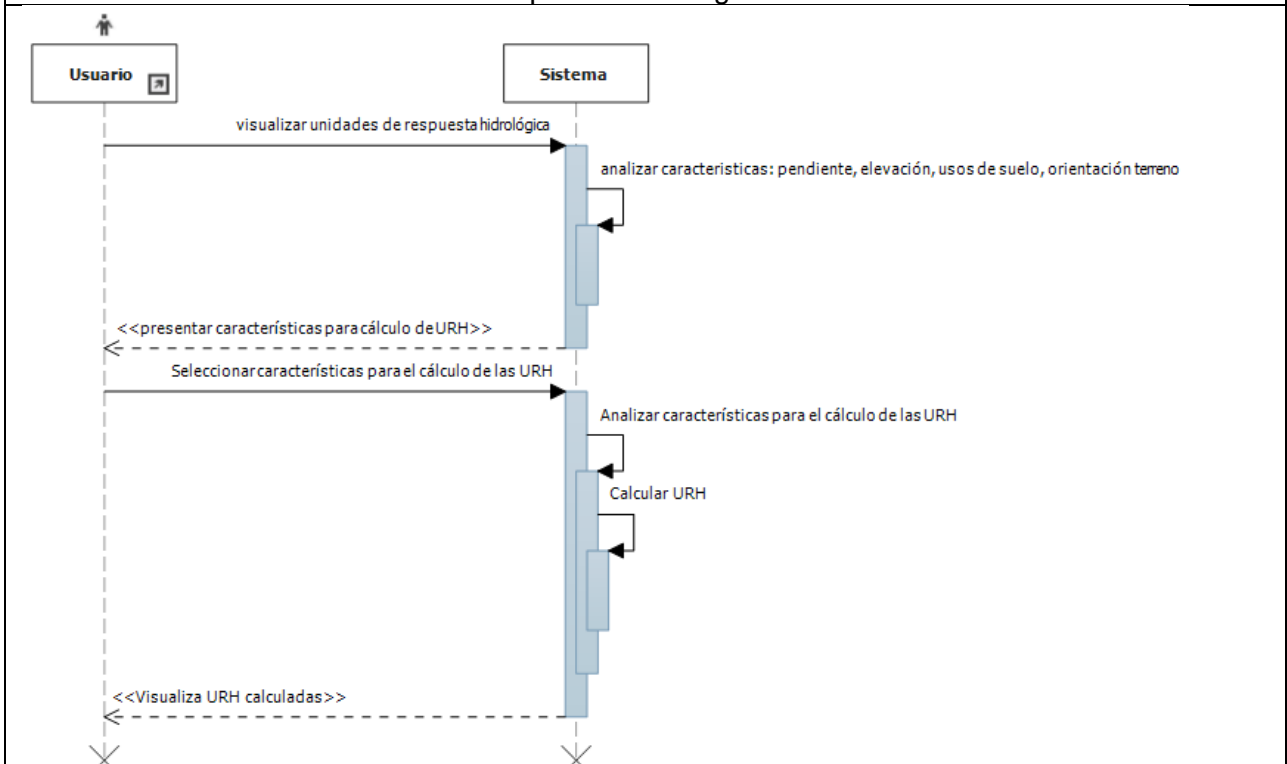
decir, las bandas de elevación, usos de suelo, mapa de pendientes, orientación del terreno. Al momento de crear la URH el sistema ofrece al usuario el conjunto de características comunes con definir las URH.

Este caso de uso finaliza cuando el sistema despliega la visualización de las unidades de respuesta hidrológica, o el usuario abandona el proceso o cierra la aplicación.

Acción del Actor	Respuesta del Sistema
1. El usuario decide visualizar las URH asociadas a la zona de estudio.	2. El sistema indica al usuario las características: pendiente, elevación, usos de suelo, orientación del terreno, con los que cuenta para el cálculo y visualización de la URH.
3. El usuario selecciona las características a utilizar para el cálculo y visualización de las URH.	4. El sistema realiza el cálculo de las URH de acuerdo con las características indicadas por el usuario, con los resultados obtenidos procede a la visualización de las URHs.
5. El usuario visualiza gráficamente la URHs de acuerdo con las características (pendiente, elevación, uso de suelo, orientación del terreno) seleccionadas.	

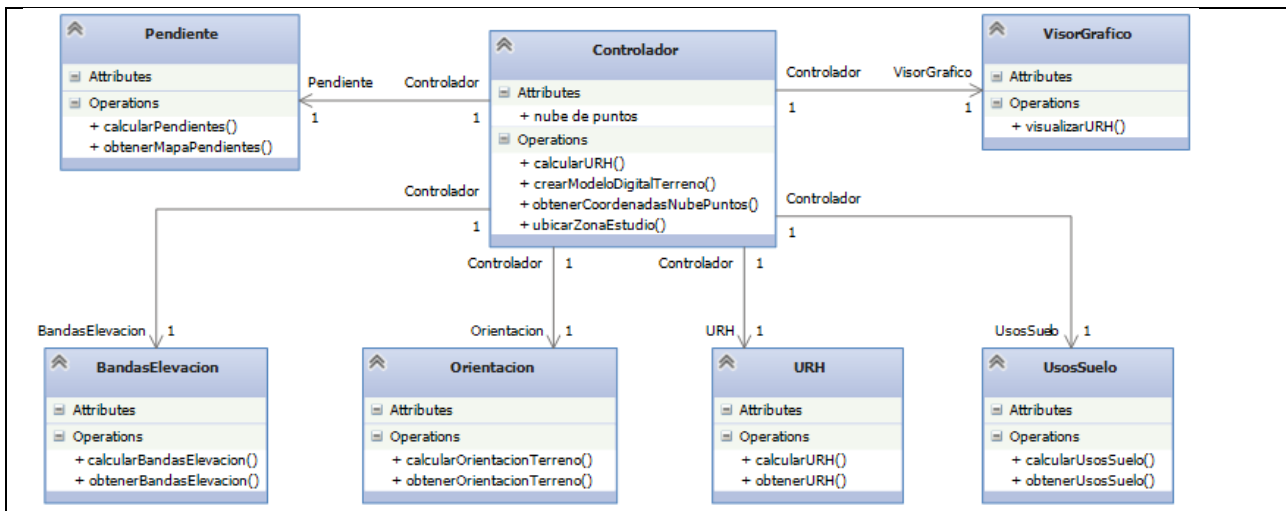
DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO

Este diagrama muestra todo el proceso necesario que realiza el actor Usuario para ejecutar el caso de uso Visualizar unidades de respuesta hidrológica.



MODELO CONCEPTUAL DEL CASO DE USO

En el modelo conceptual, se destacan los conceptos más importantes para el caso de uso Visualizar unidades de respuesta hidrológica.



A.11.2 Diseño

FORMATO CASO DE USO: VISUALIZAR UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA

Actores

Usuario (Iniciador)

Este caso de uso comienza cuando el usuario realiza la visualización de las unidades de respuesta hidrológica mediante la opción URH del menú Vista, antes de visualizar las URH el sistema indica las características comunes definidas por el usuario, es decir, las bandas de elevación, usos de suelo, mapa de pendientes, orientación del terreno; el usuario selecciona las características de acuerdo con sus necesidades, luego el usuario indica a la aplicación para que calcule y visualice las URHs. Este caso de uso finaliza cuando el sistema despliega la visualización de las unidades de respuesta hidrológica, o el usuario abandona el proceso o cierra la aplicación.

Acción del Actor

1. El usuario decide visualizar las URH asociadas a la zona de estudio haciendo uso de la opción URH del menú Vista en la aplicación.

3. El usuario selecciona las características a utilizar para el cálculo y visualización de las URH.

5. El usuario visualiza gráficamente las URHs de acuerdo con las características (pendiente, elevación, uso de suelo, orientación del terreno) seleccionadas.

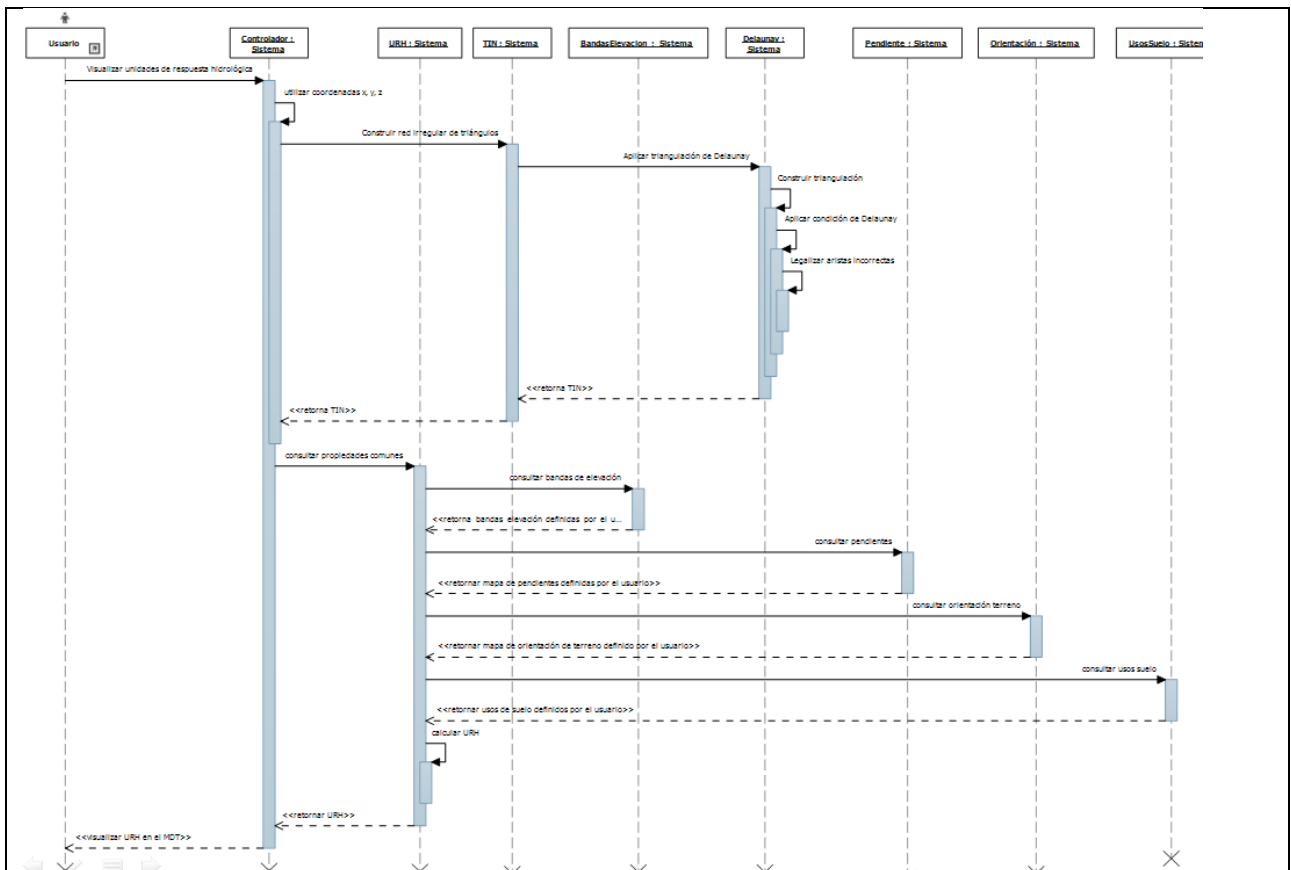
Respuesta del Sistema

2. El sistema indica al usuario las características: pendiente, elevación, usos de suelo, orientación del terreno, con los que cuenta para el cálculo y visualización de la URH.

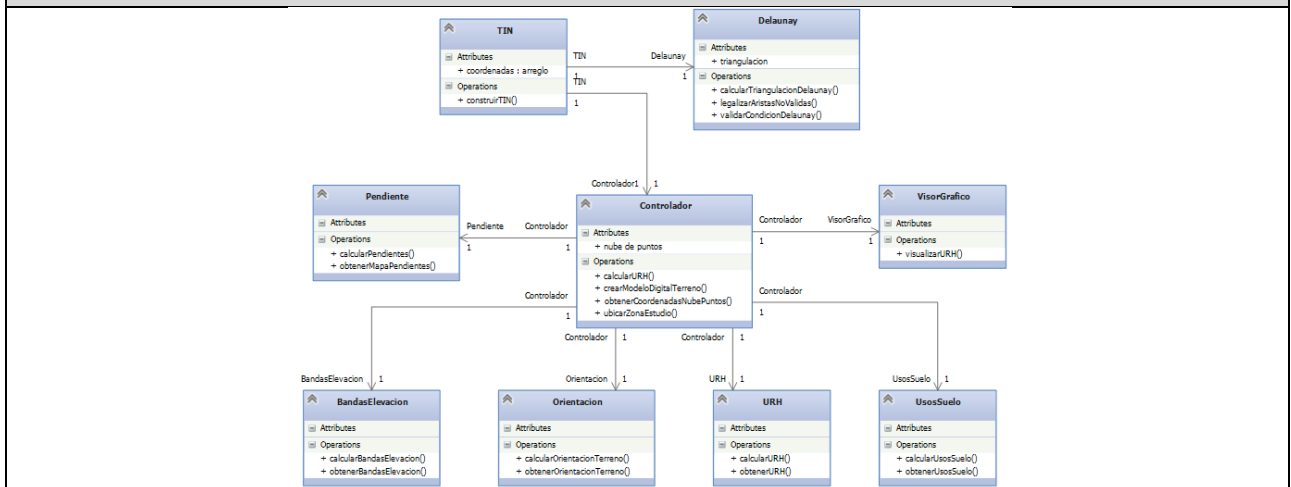
4. El sistema debe contar previamente con las coordenadas x,y,z asociadas a la zona de estudio y realizar el cálculo de las URHs de acuerdo con las características indicadas por el usuario, con los resultados obtenidos procede a la visualización de las URHs.

CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL SISTEMA DEL CASO DE USO

El usuario hace clic sobre la opción URH del menú Vista, el sistema presenta al usuario las características (pendiente, usos de suelo, elevación, orientación del terreno) que se han trabajado previamente y con las que se cuenta para el cálculo y visualización de las URHs sobre la red irregular de triángulos del modelo digital del terreno de la zona de estudio. Una vez definidas y calculadas las URHs, el sistema las visualizará gráficamente.



CAPA DE LÓGICA DE PRESENTACIÓN: DIAGRAMA DE CLASES DEL CASO DE USO



En la aplicación la clase Controlador se encarga de administrar las peticiones que realiza el usuario, delegarlo a la clase encargada, por ejemplo, La clase TIN se encarga a su vez de tareas asociadas a la lógica de negocio, como lo es: la construcción de la red irregular de triángulos que cumpla la condición de Delaunay, para lo cual se apoya en la clase Delaunay, la cual recorre la nube de puntos, aplica el algoritmo para la triangulación de Delaunay, legaliza aristas en el caso que éstas no sean válidas, para finalmente armar la TIN y utilizar dicha información para definir mediante las propiedades seleccionadas por el usuario (mapa de pendientes, mapa de orientación, bandas de elevación, usos de suelo) el cálculo de las URH sobre los triángulos según las propiedades seleccionadas por el usuario para obtener la representación visual de las URH del terreno en el MDT de la cual se encarga la clase VisorGrafico.