



Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado  
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía  
Programa de Magíster en Análisis Geográfico

**Evaluación de los niveles de pérdida de suelo, mediante el uso de Drones y Sistemas de Información Geográficos, en la cuenca del Río Claro, Yumbel, Chile.**



Trabajo Final para optar al grado de Magíster en Análisis Geográfico

**CARLOS ANDRES VALDEBENITO CONTRERAS**

Profesora Guía: Dra. Edilia Jaque Castillo

CONCEPCIÓN-CHILE 2020

## AGRADECIMIENTOS

En estas líneas quisiera dar las gracias primero que todo a mi familia por su apoyo incondicional en este proceso, en especial a mi abuela que ha dado todo por mí y espero retribuirle día a día, además dedicada especialmente a mi abuelo y mi madre que desde el cielo y mi corazón siempre guían mis pasos.

Por supuesto agradecer a mi linda señora por su infinito compromiso y amor en esta etapa, levantándome el ánimo para continuar a pesar de las adversidades que pasamos juntos este año pero que con su fortaleza logramos salir adelante.

No queda más que agradecer a mi profesora guía Dra. Edilia Jaque Castillo, por su confianza para realizar este Proyecto y también a la Directora del programa Dra. Paula Quijada, por su preocupación humana en este año.



## RESUMEN

La erosión hídrica es un problema creciente en nuestro país y es uno de los principales factores que determinan la degradación de los paisajes; las comunas que se encuentran en el secano costero e interior de la región del Biobío y Ñuble según señala el informe país de 2019, son las más afectadas por estos procesos sobre todo en un contexto de cambio climático.

Esta investigación aplicada propone evaluar la erosión actual del suelo en la cuenca hidrográfica del Río Claro, Yumbel, región del Biobío; a través del uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) integrada a un Sistema de Información Geográfica. Además, propone, evaluar a escala de detalle, la pérdida de suelo actual en un área afectada por cárcavas.

Se procedió al trabajo de campo seleccionando una de las cárcavas para sobrevolarlas y obtener las imágenes con Dron. El procesamiento fotogramétrico de las imágenes obtenidas se desarrolló usando Pix4D y Drone Deploy ([www.dronedeploy.com](http://www.dronedeploy.com)), que permitió generar un ortomosaico, un modelo 3D de la cárcava, curvas de nivel de alta precisión (0.25 metros), que permite el cálculo de volumen de suelo perdido en la cárcava.

Los resultados obtenidos indican que la pérdida de suelo estimada debido a la erosión en las condiciones actuales, para la cuenca del Río Claro, se calculó un total de **602.55** T/año, de pérdida de suelo; a pesar de aquello, y bajo el escenario seleccionado, se estima que el 70% de la superficie de la cuenca presenta erosión baja, sin embargo se registran algunas áreas con niveles altos (10%). En esta zona es donde se analiza la pérdida actual de suelo al interior de una cárcava tipo, aquí los resultados muestran que la pérdida de suelo para la cárcava seleccionada fue **de 2.457 m<sup>3</sup>** (-2.547 m<sup>3</sup>). Correspondiente al volumen de suelo que se ha perdido en el último tiempo en esa geoforma. Basado en estos resultados es posible mostrar una relación directa entre las zonas con mayor potencial de erosión (RUSLE) con las zonas con cárcavas presentes en el área de estudio, ya que se mostró una tendencia de erosión de “media” a “alta”, la cual se comprobó con los datos obtenidos en terreno, donde claramente existen procesos erosivos importantes en el sector de estudio y coincidían con las cárcavas seleccionadas para esta clasificación. Es posible concluir que la posibilidad de extrapolar los datos de pérdida de suelo en detalle a cárcavas de la misma dimensión en la cuenca nos permitirá tener una información más sólida para el diagnóstico de degradación de las cuencas hidrográficas del secano costero.

**Palabras clave:** erosión hídrica, pérdida de suelo, RUSLE, Drone Deploy, cambios cobertura de suelo.

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	7
1.1.	Generalidades.....	7
1.1.1.	Tipos de Erosión Hídrica .....	10
1.1.2.	Problemas de Erosión en Chile.....	14
1.2.	Estimaciones paramétricas: modelo RUSLE .....	16
1.3.	Medición y control de la erosión de cárcavas. ....	18
1.4.	Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV).....	20
1.4.1.	Tipos de UAV.....	20
1.4.2.	Dron Phantom 4 Pro .....	21
1.4.3.	Usos y Aplicaciones.....	22
1.4.4.	Programas para Procesamiento de Fotogrametría con UAV .....	23
1.2.4.1.	Pix4D .....	23
1.2.4.2.	Drone Deploy (www.dronedeploy.com).....	24
2.	OBJETIVOS .....	27
2.1.	OBJETIVO GENERAL .....	27
2.2.	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	27
3.	METODOLOGIA .....	28
3.1.	AREA DE ESTUDIO .....	28
3.2.	IMPLEMENTACION DEL SIG.....	30
3.3.	CÁLCULO RUSLE.....	31
3.3.1.	Cálculo de Factor “R” .....	31
3.3.2.	Cálculo de Factor “K” .....	31
3.3.3.	Cálculo de Factor “LS” .....	33
3.3.4.	Cálculo de Factor “C” .....	33
3.3.5.	Cálculo de Factor “P” .....	34
3.4.	ADQUISICIÓN DE DATOS Y GENERACIÓN DE MODELO DIGITAL DE TERRENO. ....	34
3.4.1.	Factores a tener en cuenta .....	35
i)	Trabajo en Terreno.....	35
ii)	Trabajo en Gabinete (Procesamiento de Imágenes en Software Drone Deploy). ....	36
3.5.	MODELACIÓN DE LOS VOLÚMENES DE SUELO, EN LA CUENCA DEL RÍO CLARO. ....	38
4.	ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	42
4.1.	Resultados de obtenidos para cada uno de los factores del Cálculo de RUSLE. ....	42
4.2.	Comparación entre datos obtenidos mediante RSULE y lo datos obtenidos en Terreno. ....	44

4.3	Clasificación y Procesamiento de Imágenes obtenidas con Dron. ....	48
5.	DISCUSIÓN.....	54
6.	CONCLUSIONES.....	59
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	: Relación entre la erosión y algunos factores incidentes	10
Figura 2	: Tipos de Erosión hídrica.	12
Figura 3	: Paisaje de cárcavas en cuenca del río Claro Yumbel.	13
Figura 4	: Clasificación de Aeronaves usadas como UAV.	21
Figura 5	: Modelo de Dron (DJI Phantom 4 Pro) utilizado para obtención de imágenes.	22
Figura 6	: Ubicación de la Cuenca del río Claro, Región de Biobío.	30
Figura 7	: Nomograma de Wischmeier para cálculo del factor de Erodabilidad del suelo (K).	32
Figura 8	: Computador Portátil utilizado en terreno.	36
Figura 9	: Visualización de mosaico obtenido en Drone Deploy.	37
Figura 10	: Reporte de finalización de procesamiento y entrega de ortomosaico.	38
Figura 11	: Herramienta de digitalización y cálculo de volumen en Drone Deploy.	39
Figura 12	: Opciones de plano para el cálculo de volúmenes.	40
Figura 13	: Procedimiento para realizar Cálculo de volumen en Drone Deploy.	41
Figura 14	: Resultado de cada uno de los factores para el Cálculo de RUSLE. 1) Factor R; 2) Factor K; 3) Factor LS; 4) Factor C y 5) Resultado Final RUSLE.	43
Figura 15	: Mapa Erosión (RUSLE) en cuenca Río Claro y Área de Estudio de Cárcavas seleccionadas	45
Figura 16	: Mapa Comparativo de Erosión actual (RUSLE) y Erosión Potencial (IDE, 2010) en Área de Estudio.	47
Figura 17	: Ortomosaico visualizado en ArcGis 10.1.	49
Figura 18	: Vista general de Cárcava seleccionada en Ortomosaico.	50
Figura 19	: Calculo de Área (ha) en cárcava seleccionada.	50
Figura 20	: Cárcava delimitada con nube Puntos.	51

Figura 21	: Cálculo de Volumen perdido en cárcava seleccionada.	52
Figura 22	: Imagen obtenida desde el Dron, de la cárcava seleccionada para el estudio	53

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Agentes, tipos de erosión y procesos erosivos	8
<b>Tabla 2:</b> <i>Calculo de constante de la pendiente en porcentaje</i>	18
<b>Tabla 3:</b> Textura de Suelo (Mannaerts, 1999)	32
<b>Tabla 4:</b> Coberturas de uso de suelo para el área de estudio	34
<b>Tabla 5:</b> Coordenadas obtenidas en terreno, de zonas de Cárcavas en Área de Estudio	44



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Generalidades

La pérdida de suelo es uno de los problemas ambientales más graves en las zonas costeras en todo el mundo (Yoshikawa et al, 2010). El constante crecimiento de la población ha acentuado la presión sobre el recurso suelo, transformándolo y degradándolo progresivamente. Por otra parte, la aplicación de inadecuadas prácticas agrícolas ha conducido en muchas partes del mundo a un desgaste acelerado del recurso (Clemens et al. 2010). Estos problemas asociados a la erosión de suelos serán más nocivos en el futuro debido a los efectos del calentamiento global (IPCC 2007).

Actualmente, uno de los principales problemas ambientales lo constituye la erosión, lo que afecta tanto al medio natural, como el medio ambiente construido. Gran parte de las regiones del mundo presentan problemas de degradación del recurso suelo en distinta forma y grado, entre las que destaca la erosión, contaminación, salinización, entre otras.

Según García-Chevesich (2008), el término “erosión” proviene del latín “erodere”, que significa roer; además, se refiere a dicho fenómeno como el desgaste de la superficie terrestre bajo la acción de los agentes erosivos, siendo los principales el agua y el viento. En el mismo contexto, Pidwirny (2006) define la erosión como la degradación de los suelos, los sedimentos, el regolito, los fragmentos de roca y el paisaje, a través de distintos medios externos como el viento, el hielo y el agua. Por otra parte, la erosión de un determinado suelo se considera como el proceso de pérdida de capas o movimiento de partículas de éste, generado por agentes externos naturales (viento, agua, hielo) y/o antrópicos (FAO, 2009). Es importante mencionar que la erosión puede ser provocada por distintos agentes, los cuales generan una energía capaz de erosionar el suelo, en donde estos pueden actuar solos, o en conjunto (Tabla 1). Al respecto, se identifican fundamentalmente cuatro, a saber, el agua (erosión hídrica), el viento (erosión eólica), el hielo (erosión glacial) y la gravedad (erosión por gravedad).

**Tabla 1:** Agentes, tipos de erosión y procesos erosivos.

Agente	Tipo de Erosión	Tipo de Proceso Erosivo.
<b>Agua</b>	<b>Erosión Hídrica</b>	<b>Erosión en cursos de agua</b> <b>Erosión de Impacto</b> <b>Erosión Laminar</b> <b>Erosión en Riles</b> <b>Erosión en Cárcavas</b> <b>Erosión costera</b>
<b>Viento</b>	Erosión Eólica	Abrasión Deflación
<b>Hielo</b>	Erosión Glaciar	Movimiento de Glaciares
<b>Gravedad</b>	<b>Erosión por Gravedad</b>	<b>Derrumbes</b> <b>Movimiento en masas</b> <b>Suelos repantes</b>

Fuente: Field, 1997. Citado por García -Chevesich 2008.

Dentro de los factores que condicionan la pérdida de suelo se ve incrementada por los factores de Precipitación, pendiente, sustrato litológico y morfologías y el uso de suelo. De este modo, estudios realizados por Oyarzún (1993) han demostrado que la intensidad de las precipitaciones constituye el agente causal y preponderante del proceso erosivo, ya que está por sobre la duración y frecuencia de las mismas, en el cual a medida que aumenta la intensidad de la lluvia se incrementa su energía cinética y por ende la dispersión del suelo. Este factor está condicionado por el porcentaje de cobertura vegetal, ya que protege el suelo disipando la energía de las gotas de agua. En consecuencia, la dispersión del suelo por efecto del impacto de las gotas de lluvia, el volumen y la velocidad del escurrimiento disminuyen sustancialmente con el incremento de la cobertura vegetal (Muñoz-Pedrerros 2000).

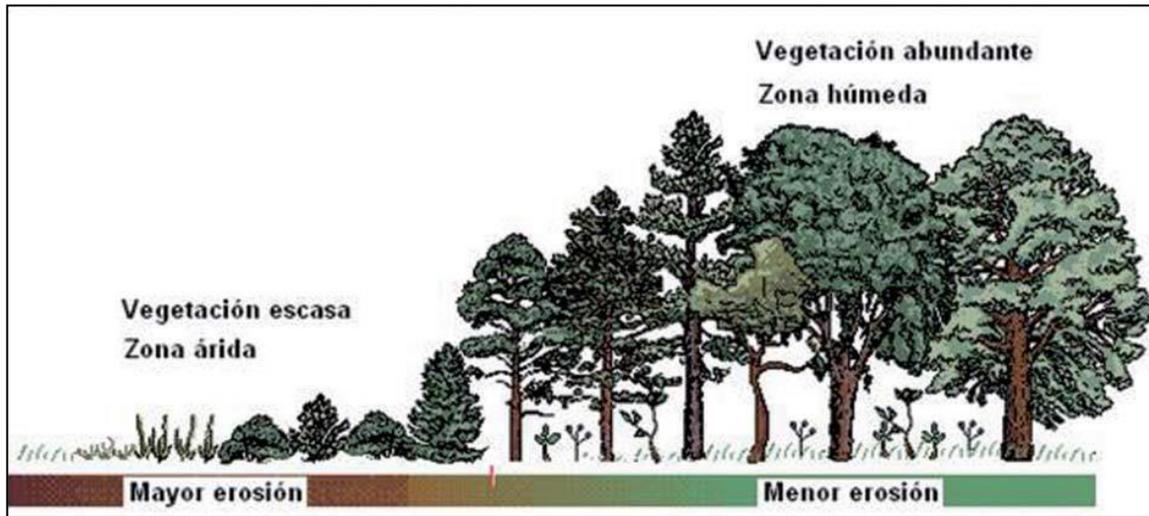
En segundo lugar, la pendiente es un factor de una influencia considerable en el transporte de sedimentos y se relaciona directamente con procesos de morfogénesis (Oyarzun, 1993). Mientras más pendiente posea una ladera, mayor es el arrastre de sedimentos a causa del aumento de la velocidad de la corriente del agua (Muñoz-Pedrerros, 2000).

El sustrato litológico y la morfología del área constituyen el tercer factor que explica la degradación de los lomajes costeros de la Cordillera de la Costa (Peña-Cortés 1999). Muchos sectores de cordones y plataformas de erosión dominan el paisaje sobre roca granítica del Paleozoico severamente meteorizada. Debido a esto, el material parental que se genera es muy pobre para el desarrollo adecuado de los suelos, ya que estos se encuentran desprovistos del horizonte A, tienen un alto contenido de arcilla, lo que reduce la infiltración del agua provocando un mayor escurrimiento superficial (Endlicher, 1988).

El último factor, es el uso del suelo, ya que incide en procesos de erosión, de acuerdo al tipo y técnicas de manejo utilizadas. Un ejemplo, es el caso de Chile y su agricultura, donde la quema de residuos agrícolas, el barbecho y el cultivo en sentido de la pendiente son detonantes para la erosión del suelo, ya que se elimina la cubierta vegetal de este quedando desprotegido frente a las gotas de lluvia (FAO, 2009).

Por lo tanto, al referirse a los factores que afectan a la erosión, Morgan (2005) señala que dichos factores están en función del tipo de erosión en cuestión. Sin embargo, como regla general, se puede decir que la erosión que ocurrirá en un suelo va a depender, en forma directa, de ciertas variables o factores como el clima, la vegetación, la hojarasca, el tipo de suelo, la topografía, la velocidad del flujo y el uso de la tierra, los cuales se encuentran muy relacionados entre sí (Pizarro et al, 2009) (Figura 1).

**Figura 1:** Relación entre la erosión y algunos factores incidentes



Fuente: Pizarro et al 2009.

### 1.1.1. Tipos de Erosión Hídrica.

La erosión hídrica constituye uno de los principales procesos de pérdida de suelo y representa una de las formas más completas de degradación, englobando tanto la degradación física del suelo como la química y la biológica (De Regoyos, 2003 citando a Colomer, 2001). Al respecto, tal como lo han planteado diversos autores, la erosión hídrica superficial corresponde al principal problema del sector silvoagropecuario en Chile (Ellies, 2000). Por su parte, Mintegui y López (1990) definen este tipo de erosión como el proceso de disgregación de las partículas del suelo por la acción del agua, el cual culmina con el depósito de los materiales transportados por la corriente en áreas de sedimentación, cuando la capacidad de arrastre de las aguas se reduce hasta el punto de no permitir la continuación en el flujo de las partículas terrosas previamente incorporadas al mismo.

La erosión hídrica puede ocurrir de variadas formas. La Statewide Urban Designs and Specifications (SUDAS, 2006) señala, entre las principales, a la erosión por salpicadura, la erosión laminar, la erosión por surcos o en regueros, la erosión por cárcavas y la erosión en bancos aluviales (Figura 2).

### a) Erosión por salpicadura y erosión laminar

El primer paso en el proceso de erosión hídrica comienza cuando las gotas de lluvia impactan la superficie con una energía suficiente para desplazar partículas de material sin consolidar, dando lugar al proceso denominado erosión por salpicadura (SUDAS, 2006).

La duración, intensidad y frecuencia de las precipitaciones, logran la remoción de capas delgadas y uniformes de suelo sobre toda el área, produciendo lo que se denomina como erosión laminar (Favis-Mortlock, 2007). Al respecto, Mintegui y López (1990) señalan que este proceso es el más perjudicial debido a que en la mayoría de las ocasiones no se le reconoce y, por ende, pocas veces se le trata. Para García (2006), la erosión laminar se puede identificar mediante los siguientes síntomas:

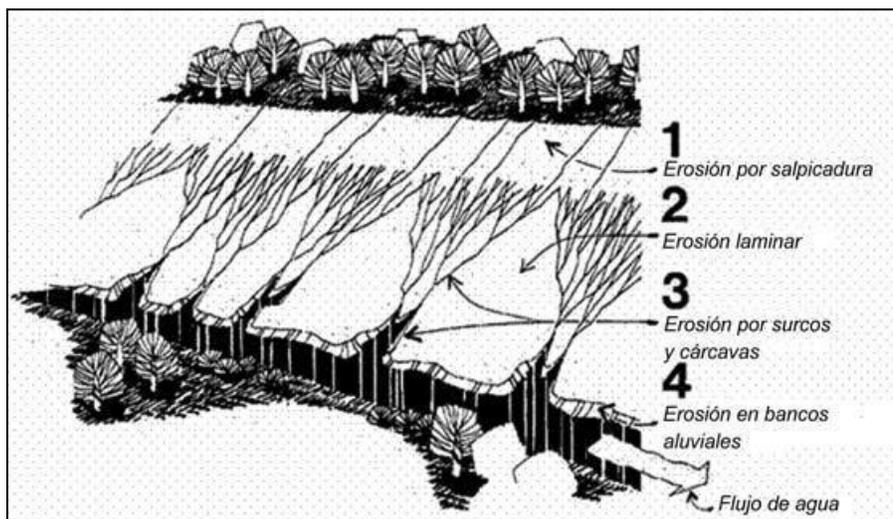
- Presencia de montículos en el suelo
- Plantas con su sistema radicular al descubierto
- Invasión de especies vegetales específicas de suelos degradados

Junto a lo anterior, otra manera de identificar el accionar de la erosión laminar es la presencia de pavimentos de erosión, que corresponde al proceso que deja al descubierto áreas con presencia de piedras de diferentes tamaños, las cuales originalmente estaban cubiertas por el suelo (Pizarro et al, 2009). La erosión hídrica laminar es una forma de erosión superficial que se produce por acción del escurrimiento, perdiéndose una fina y uniforme capa de toda la superficies del suelo en forma de lámina. Algunos autores como Troeh et al (1991), denominan “sheet erosion” a la combinación de erosión por salpicadura, mientras otros como Fangmeier et al (2006) denominan a esta combinación como “interrill erosion”. Es proceso produce una mayor pérdida neta de suelo que la erosión por salpicadura, siendo el tamaño de partículas más afectado el que se desprende debido a la energía de la lluvia. Algunos autores postulan que el flujo laminar no existe, y que en realidad son flujos turbulentos poco perceptibles, que van organizándose e incrementando su potencial erosivo a medida que incrementa la velocidad del escurrimiento (Morgan, 1997).

### b) Erosión por surcos o en regueros

Este tipo de erosión ocurre cuando, producto de pequeñas irregularidades en la pendiente del terreno, la escorrentía se concentra en algunos sitios hasta adquirir volumen y velocidad suficientes para hacer cortes y formar surcos (Farfán, 2002). Según Cairns et al (2001) los surcos corresponden a canales miniatura, que son el resultado de la remoción de aproximadamente 10 a 50 cm. de suelo por acción de la escorrentía, la que transporta material erosionado hacia canales o riberas. Estos autores señalan, además, que el accionar constante del agua a través de estos canales, podría producir barrancos o cárcavas.

**Figura 2:** Tipos de erosión hídrica.



Fuente: USDA (2002).

### c) Erosión en bancos aluviales

De acuerdo a SUDAS (2006) la erosión en bancos aluviales se produce a partir de los procesos erosivos que se generan en el lecho de los barrancos o cárcavas, haciéndolos más profundos, favoreciendo con esto que el material de las riberas se vuelva inestable y se comience a desprender material desde las zonas altas. El mismo autor señala que este tipo de erosión provoca que las vías fluviales ondulen, debido a la acumulación de suelo erosionado en el lecho.

#### d) Erosión en barrancos o cárcavas

Se define como el proceso de remoción de suelo o de pequeñas piedras, por acción del agua, que forma depresiones mucho más grandes que los surcos, los que usualmente transportan material durante o inmediatamente después de ocurrida la tormenta (Cairns et al., 2001). Al respecto, Morgan (1997) señala que, al comparar estas depresiones con los cauces permanentes, relativamente llanos y cóncavos en su perfil, las cárcavas se caracterizan por tener cabeceras y saltos a lo largo de su curso. Además, poseen una mayor profundidad, menor anchura que los cauces estables y trasportan más cantidad de sedimentos (Figura 3). Por otra parte Osterkamp (2008), señala que la erosión en cárcava consiste en el vaciado de las partículas del suelo o sustrato por un flujo concentrado que da lugar a estrechas incisiones, de mayor tamaño y profundidad que un reguero, y que generalmente llevan agua sólo durante e inmediatamente después de fuertes precipitaciones.

El crecimiento de una cárcava puede producirse a través de tres mecanismos principales; el crecimiento aguas abajo de su cabecera, el ensanchamiento del cauce y su profundización. Cuando el flujo salva el escarpe de la cabecera, se produce un continuo remolino sobre la base del mismo que da lugar a su socavación (Martínez, 2017).

**Figura 3:** Paisaje de cárcavas en cuenca del río Claro Yumbel.



Fuente: Fotografía del autor. (2019)

Describen el término "erosión remontante" o "regresiva" como el proceso de expansión de una cuenca hidrográfica, relacionado con el progreso gradual hacia la cabecera de la cuenca, mediante la incisión fluvial en la parte alta de los ríos como consecuencia directa de la caída del nivel base por causas climáticas y/o tectónicas. Este desarrollo de cárcavas pone en riesgo a la red vial, especialmente cuando la erosión *remontante* alcanza las calzadas o cuando los deslizamientos laterales de grandes incisiones desestabilizan amplios tramos de viales (Martínez, 2017). La erosión en cárcavas es el proceso más destructivo del suelo y uno de los más presentes en el secano costero chileno y particularmente en el área de estudio de esta investigación, relevando, así como una temática en el contexto de un problema concreto de nuestro territorio.

### **1.1.2. Problemas de Erosión en Chile.**

De acuerdo a Pizarro et al. (2003a) la erosión de los suelos en Chile, *"es considerado uno de los problemas ambientales más significativos del sector silvoagropecuario. Asimismo, dicha problemática está asociada a una disminución de la productividad y eficiencia de los suelos, provocada por una baja retención tanto del agua como del suelo, cuya tendencia a escurrir se manifiesta en mayor medida en terrenos con pendientes pronunciadas"*. La mayor causa de pérdida de suelos en Chile son los procesos erosivos, causados por fenómenos naturales o bien inducidos por el hombre, ya sea talando la vegetación natural de matorrales y bosques, construyendo canales de riego para habilitar tierras para la agricultura en lugares inapropiados e induciendo con ello la extensión de procesos erosivos naturales por acción de los vientos, la lluvia o el riego.

En Chile, la erosión de los suelos se ha constituido en un problema socio-ambiental de relevancia en las últimas décadas, especialmente para el sector agropecuario, por ser el suelo un recurso no renovable a escala humana y altamente vulnerable a las acciones antrópicas, además, de las condiciones de variabilidad climática. Sin embargo, el fenómeno erosivo no es nuevo en Chile, sino que se ha mantenido como una problemática constante desde que se tienen registros de esta situación, desde mediados del siglo XX (CIREN, 2010). Extensas áreas de la Cordillera de la Costa, que incluyen las provincias de Concepción, Bío-Bío, Malleco y Arauco, fueron convertidas en verdaderos graneros para abastecer de trigo los mercados generados desde mediados del siglo XIX y hasta fines de la década de 1920. Las comunas con graves problemas de erosión de tipo hídrica se encuentran en el secano

costero e interior de la región; Quirihue, Coelemu, Treguaco, Florida, **Yumbel** y Ninhue.

La erosión en laderas se puede desarrollar en diferentes formas y estados de avance, en esta comuna debido a la existencia de roca meteorizada (maicillo) y dependiendo de su granulometría y permeabilidad, existen los procesos de erosión lineal y erosión laminar. La primera se desarrolla en forma concentrada a través de surcos, zanjas o cárcavas, las que pueden llegar a tener grandes dimensiones. Y la segunda, el agua no se concentra sino que escurre en manto superficial, arrastrando una lámina de material superficial del suelo.

Los agentes aceleradores evidenciados en estas zonas están constituidos por la deforestación (tala de bosques), el cambio de uso del suelo a la producción agrícola, las quemas e incendios forestales. Siendo Yumbel una de las comunas más degradadas desde la perspectiva del suelo, proponemos aplicar una metodología que nos permita revisar esos niveles de degradación y clasificación de niveles de degradación, aportando con herramientas de análisis de fácil acceso para la toma de decisiones.

Tal como es el caso de la zona en la que se encuentra emplazada la cuenca del Río Claro, la cual se ha encontrado expuesta a un proceso de deforestación importante a raíz de la expansión forestal (Muñoz & Rebolledo, 2017). Es así como la evaluación de los niveles de erosión se vuelve relevantes para los estudios medioambientales que buscan dar cuenta de una realidad donde la naturaleza se encuentra afectada por la actividad económica, coincidiendo con la creciente tendencia social acerca de la preocupación del medio ambiente.

A raíz de esto, la erosión resulta una problemática en si misma ya que conceptualmente es inherente a la degradación de los suelos. En Chile, el panorama ha sido estudiado a través del “Informe país: Estado del medio ambiente en Chile 2018” el cual describe que los procesos erosivos en Chile son la principal causa de la pérdida de suelo y que un 45,7% de la superficie del país se encuentra afectada por la erosión (Centro de Análisis de Políticas Públicas, 2018). La cuenca del Río Claro es parte de la Cordillera de la Costa, en ella se observa, signos de una degradación avanzada del paisaje; bosques rozados, caminos cortados, campos con surcos, pastizales con grandes manchas sin vegetación, matorrales con arbustos típicos de pastoreo, grandes rocas desnudas y cárcavas profundas (Endlicher, 1988), donde las zonas rurales son las principales afectadas por la disminución de su capacidad

productiva (Jaque, 2008).

### 1.2. Estimaciones paramétricas: modelo RUSLE.

Existen varios modelos para la cuantificación de la erosión por lluvia, siendo el modelo denominado Ecuación Universal de Perdida de Suelo Revisada (RUSLE, por sus siglas en ingles), (Renard, et al, 1997), el más utilizado. Este modelo utiliza los mismos cálculos de erosividad por lluvia que el modelo llamado Ecuación Universal de Perdida de Suelo (USLE, por sus siglas en ingles), (Wischmeier & Smith, 1958), con la excepción de los cálculos de energía de la lluvia.

Este método se fundamenta en la capacidad que poseen las lluvias para provocar erosión y en la resistencia natural de la tierra (Wischmeier & Smith, 1978). Es un método que se puede aplicar en cualquier región, de allí el término universal, ya que considera los principales factores que intervienen en el proceso de erosión hídrica (precipitaciones, suelo, relieve, coberturas y prácticas de conservación). Permite predecir la erosión actual y realizar simulaciones con diferentes escenarios.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE) es el modelo matemático más utilizado para predecir las pérdidas del suelo debidas a la erosión superficial. Durante muchos años, la USLE ha sido utilizada en terrenos agrícolas (desde 1957), y desde 1972 en adelante también en pastizales y terrenos forestales (Martínez, 2017). En un principio fue denominada USLE (Universal Soil Loss Equation) pero esta fue revisada en el año 1997, pasándose a llamar RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) (Renard et al, 1997).

El modelo es paramétrico y para predecir la erosión potencial se toma en consideración los siguientes factores:

$$E = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Dónde:

- **E:** cantidad anual de suelo erosionado por unidad de área ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). Se obtiene por el producto del resto de los factores.

- **R:** es el factor de erosión (erosividad) por la escorrentía de lluvia ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). El índice de erosión es una medida de la fuerza erosiva de una lluvia determinada. Se requieren pluviómetros de registro automático. Una alternativa de aproximación para expresa su valor es empleando la siguiente ecuación o índice de Fournier modificado:

$$R = \sum \frac{p^2}{P}$$

Donde p: precipitación mensual ; P: Precipitación anual

- **K:** factor de erosión (erodabilidad) relacionado con la susceptibilidad de la erosión del suelo y la tasa de escorrentía ( $\text{t ha}^{-1}$ ) / ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ ). Es función de la textura, estructura, contenido de materia orgánica, permeabilidad, entre otras características edáficas. El factor *K* expresa la pérdida anual media de suelo por unidad del Factor *R*, para unas condiciones tipo de suelo desnudo, labrado recientemente según la dirección de la pendiente, sin prácticas de conservaciones, en las condiciones normalizadas para las parcelas establecidas por Wischmeier et al (1978) y en las que los demás factores adquieren el valor unidad.
- **LS:** factor topográfico relacionado con la longitud y la pendiente (factor con valor adimensional) (Tabla 2). Donde el Factor de Longitud de Pendiente (*L*) sería:

$$L = \left( \frac{X}{22.13} \right)^m$$

Donde;

*X* = longitud de la ladera, distancia desde el inicio de la escorrentía superficial al inicio del depósito de sedimentos.

*m* = constante que depende de la pendiente (*s*), que a su vez se calcula:

El factor inclinación (*S*) sería:

$$S = \frac{0.43 + 0.3s + 0.043s^2}{6.613}$$

Donde *S*: Pendiente expresada en %.

**Tabla 2:** *Calculo de constante de la pendiente en porcentaje*

S(%)	m
0-1	0.2
2-3	0.3
4-5	0.4
>5	0.5
S(%)	m
0-1	0.2
2-3	0.3
4-5	0.4
>5	0.5

Fuente: Wischmeier et al (1978)

- **C:** factor de la cobertura vegetal (factor con valor adimensional), trata de la relación entre las pérdidas de suelo en un terreno cultivado en condiciones específicas o con determinada vegetación natural y las pérdidas correspondientes de un barbecho continuo (Martínez, 2017).
- **P:** prácticas de control/conservación (factor con valor adimensional). Indica la relación que existe entre las pérdidas de un suelo con cultivo a nivel, en franjas, en terrazas, en bancales o con drenaje superficial, y las pérdidas de suelo correspondientes a la labor en línea de máxima pendiente (Martínez, 2017).

### 1.3. Medición y control de la erosión de cárcavas.

El control de erosión por cárcavas, a pesar de la existencia de algunos ejemplos aislados de control, sigue siendo una asignatura pendiente, que se realiza con una disparidad de criterios, algunos siempre acertados (Martínez, 20017). En los últimos años se han desarrollado materiales para un mejor diseño de su control (Gómez 2003, EUTROMED 2015) pero en numerosas ocasiones no se previene su aparición, su control se aborda cuando la cárcava ha alcanzado dimensiones muy grandes, o se realiza con fallos de diseño que ocasiona el colapso de las medidas de control en las siguientes tormentas importantes (Taguas et al. 2012a).

Su elevado coste, en relación a la capacidad de inversión de las explotaciones, es otro obstáculo en el que se debe seguir avanzando en reducir. Existe un uso poco desarrollado de las barreras vegetales, que podrían ser muy útiles para reforzar el efecto de las cubiertas vegetales en las zonas perimetrales de cauces, caminos y explotaciones. Existen algunos ejemplos, por ejemplo el proyecto INSPIA (2015) que incluye márgenes multifuncionales y buffers alrededor de cauces, pero no se ha encontrado información publicada sobre su extensión en el sector ni sobre su efectividad real en el control de erosión.

Jiang & Piza (2015), indican que la situación general con respecto a la efectividad de las barreras vegetales (buffers) en países donde ha sido evaluada esta es normalmente menor que la obtenida en estudios experimentales debido, especialmente, a la dificultad de obtener una barrera vegetal bien implantada. Dada la importancia que estas barreras podría tener parece apropiado intensificar los esfuerzos en desarrollar materiales y metodologías para su implantación y mantenimiento, así como una evaluación rigurosa de su efectividad en nuestras condiciones.

Por otra parte, para reducir la incertidumbre en las predicciones de modelos y en la optimización de las técnicas de control de erosión, es previsible que jueguen un papel relevante las técnicas de trazado de sedimento: marcando suelo con algún trazador fácilmente identificable; o de huella de sedimento, "fingerprinting" (Walling, 2013), en la que se comparan las propiedades del sedimento con las del suelo de las zonas potenciales de origen discriminando la fracción que viene de cada zona.

Asimismo, algunos autores señalan que los principales métodos para cuantificar el suelo que se ha perdido por erosión son: transectos de cárcavas, clavos con rondanas, corcholatas de botellas y lotes de escurrimiento (Anaya et al, 1977). Mientras que de manera remota los métodos de evaluación de la erosión en cárcavas, basados en las imágenes de satélite, son las técnicas más apropiadas sobre todo en zonas semiáridas donde hay poco recubrimiento vegetal (García & Pérez, 2005). A partir de 1972, con el desarrollo del programa Landsat, el uso de imágenes digitales desde satélites se volvió frecuente en el estudio y evaluación de los recursos naturales en general, incluyendo estudios sobre erosión del suelo.

#### **1.4. Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV).**

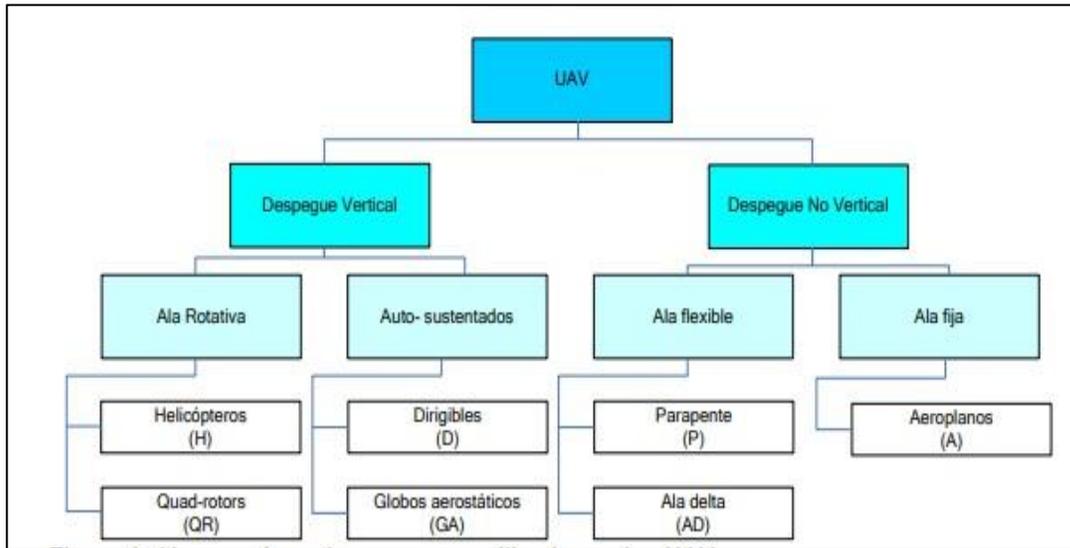
Un vehículo aéreo no tripulado (U.A.V. "Unmanned Aerial Vehicle") es una aeronave robótica con motor que es controlada de forma remota por un operador en Tierra (Cuerno, 2015). Creados con la finalidad de usarlos en actividades militares debido a su bajo costo y a que se suprime por completo el riesgo humano, pero gracias a los avances tecnológicos se ha logrado explotar su potencial para usarlos en un sin número de aplicaciones civiles. Actualmente los UAV's, también conocidos como drones, cuentan con un sistema de posicionamiento integrado, sensores y cámaras de avanzada tecnología que permiten obtener videos y fotos de alta definición (Costales, 2018).

##### **1.4.1. Tipos de UAV.**

La clasificación de estos equipos se puede realizar desde diferentes puntos de vista. Barrientos et al (2008) clasifica a los UAV's de acuerdo al tipo de aeronave y su forma de despegue, la cual se considera una clasificación simple pero es la más utilizada (Figura 4).

El uso de cada uno de estos tipos de aeronaves depende netamente del producto que se desea obtener y la capacidad de vuelo que se requieran para cumplir con un levantamiento de información. Los más utilizados en la actualidad para fotogrametría en 2D y 3D son los Quad-rotors de ala rotativa. Si bien su alcance y autonomía de vuelo son una limitante, estos presentan facilidad de maniobrabilidad, tienen capacidad de realizar vuelos verticales y de volar en espacios cerrados y de manera estacionaria (Barrientos et al, 2007).

**Figura.4:** Clasificación de Aeronaves usadas como UAV.



Fuente: Barrientos et al, 2007

#### 1.4.2. Dron Phantom 4 Pro.

El Phantom 4 Pro (Figura 5) es un dron con despegue vertical de ala rotativa y capacidad de una batería extraíble desarrollado por la empresa DJI. Se lo considera un dron de gama media en referencia a su precio principalmente, ya que presenta características suficientes para poder realizar trabajos de ingeniería, y en comparación con otros equipos utilizados para la misma finalidad técnica, este presenta un costo menor. Dentro de las especificaciones establecidas por el fabricante (DJI, 2018) se detallan las siguientes:

- Autonomía de vuelo de 30 minutos por batería.
- Cámara integrada de 20 megapíxeles con sistema de estabilización (Gimbal) que permite obtener videos de ultra alta definición (4k).
- Rango de alcance del control remoto de hasta 7 km.
- Permite realizar vuelos programados a través de aplicaciones para dispositivos móviles.
- Sistema integrado de posicionamiento por satélite (GPS y Glonass).
- Alcanza una velocidad máxima de hasta 75 km/h
- Sistema de auto estabilización frente a condiciones meteorológicas de vientos de hasta 50 km/h.

**Figura 5.** Modelo de Dron (Dron DJI Phantom 4 Pro) Utilizado en terreno para obtención de imágenes.



Fuente: Fotografía del autor.

#### **1.4.3. Usos y Aplicaciones**

A través de los años y con avances tecnológicos las aplicaciones civiles de los UAV's se han extendido hacia varios campos, Algunas de estas aplicaciones son las siguientes (Costales, 2018):

- Inspección de infraestructuras como oleoductos, líneas de transmisión eléctrica, tuberías de conducción de agua para hidroeléctricas, entre otras obras civiles que puedan presentar un difícil acceso.
- Monitoreo de desastres naturales evitando el riesgo vidas humanas.
- Levantamiento de información para realizar cartografía y topografía. Con el uso de drones en esta área es posible minimizar los riesgos laborales, costos de equipos y tiempos de trabajo.
- Cálculos de superficies contaminadas en donde el contacto directo con el contaminante puede presentar un riesgo para la salud.
- Monitoreo de contaminación atmosférica con el uso de sensores ambientales integrados al UAV.
- Agricultura de precisión y control de plagas mediante el uso de cámaras Multiespectrales e Hiperespectrales con sensores de calor.
- Inspección de áreas quemadas y seguimiento de incendios forestales.
- Vigilancia de áreas protegidas y rastreo de especies sin afectar su entorno minimizando el impacto ambiental por actividades antropogénicas.

- Observación y monitoreo ambiental en zonas de contaminación química o nuclear a las cuales no pueden acceder personas.
- Cálculos de volumen de escombros, residuos orgánicos, chatarra, y materiales reciclables para lograr el máximo de aprovechamiento de los mismos.
- Vigilancia de rellenos sanitarios para obtener información en un menor tiempo de su capacidad remanente, presencia de vectores y cálculo de volumen de residuos dispuestos.

#### **1.4.4. Programas para Procesamiento de Fotogrametría con UAV.**

Existen varios programas de fotogrametría disponibles en el mercado cuya aplicación varía en función del resultado que se desea obtener. A pesar de que cada programa cuente con atributos diferentes todos siguen un flujo de trabajo similar para el procesamiento de la información (Rossi et al, 2012). Los programas para el procesamiento de las fotografías tomadas con un dron deben contar con todas las herramientas que permitan trabajar con mayor precisión y generen resultados confiables (Mitsikostas, 2017). Entre estos programas utilizados para el procesamiento de fotogrametría se destacan Pix4D y Drone Deploy ([www.dronedeploy.com](http://www.dronedeploy.com)), programas licenciados pero que permiten al usuario evaluar cada uno de sus atributos durante un período de prueba determinado.

##### **1.2.4.1. Pix4D**

Este programa fue desarrollado en 2011 bajo la principal función de crear modelos y mapas digitales en 2D y 3D georeferenciados y de alta precisión a partir de imágenes de drones. Entre algunos de los productos que puede entregar este programa, se detallan en su página web los siguientes (Pix4D, 2018):

- Nube de puntos 3D: reconstrucción digital geolocalizada de manera precisa en todos los puntos de interés.
- Modelos digitales de superficie y terreno: valores de elevación de cada pixel que permiten trabajar posteriormente con herramientas SIG.
- Ortomosaicos: mapas digitales de alta resolución georeferenciados a partir de las imágenes procesadas.
- Puntos de control en tierra (GCP); permite ingresar coordenadas de puntos de control para

aumentar la precisión de los trabajos realizados.

- Cálculos de volumen: es posible realizar cálculos de volúmenes precisos a partir de una representación gráfica perfecta de las zonas de interés, además es posible ajustar la altura de la superficie base antes de realizar el cálculo.
- Líneas de contorno: representación de la topografía del terreno que muestran cada curva de nivel con contornos cerrados y permite exportar las mismas en formatos compatibles con programas de diseño asistido por computadora o sistemas de información geográficas.
- Cálculo de áreas: permite realizar medidas de superficies de cualquier tipo con coordenadas precisas de cada uno de los vértices de las zonas de interés.
- Mapas de reflectancia: evalúa la reflectancia basándose en el píxel de imágenes Multiespectrales.
- Mapas de índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para evaluar el desarrollo de vegetación en función de la intensidad de radiación que esta emite o refleja.
- Termografía: genera mapas de radiación electromagnética con valores de temperatura precisos en cada pixel.

#### 1.2.4.2. Drone Deploy ([www.dronedeploy.com](http://www.dronedeploy.com)).

Este programa fue lanzado al mercado en 2013, para realizar procesamientos de imágenes digitales (fotografías obtenidas en Dron) y la generación de datos espaciales en 3D para su uso en SIG y permitir realizar mediciones de objetos de diferentes escalas. La aplicación de software DroneDeploy automatiza el vuelo en avión teledirigido y también facilita la captura de imágenes aéreas. La plataforma de software DroneDeploy procesa las imágenes de los vehículos aéreos no tripulados utilizando la visión por ordenador -online-, convirtiéndolas en mapas en 2D, 3D, modelos y mucho más. Este será el software utilizado para el procesamiento de las imágenes en este estudio. Para crear un mapa o modelo 3D de alta resolución, se sube las imágenes a la plataforma de nube de Drone Deploy. Su software utiliza la visión por ordenador y algoritmos para combinar las fotos y generar los mapas en 3D.

Otros datos de salida incluyen las mediciones de volumen y el Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI), utilizado por los aviones teledirigidos multiespectrales. La aplicación DroneDeploy por sí misma le permite hacer lo siguiente:

- Medir el volumen de un terreno.
- Permitir visualizar datos de elevación.
- Permitir Monitorear la salud de la planta.
- Generar líneas de contorno.
- Realizar un seguimiento de los cambios de un área o proyecto a lo largo del tiempo.
- Crear y ver mapas ortomosaicos en 2D y 3D.
- Salida en muchos formatos (JPG, TIFF, OBJ, LAS, SHP, DXF).

La plataforma de software DroneDeploy crea los mapas 3D a partir de las imágenes almacenadas en sus servidores en la nube. DroneDeploy se encarga de sus datos asegurándose de que estén siempre disponibles y se hayan realizado copias de seguridad. Los mapas 3D pueden ser masivos en tamaño y requieren mucha energía para procesar las imágenes en mapas y modelos, lo que puede producir datos significativos. Generalmente, una computadora estándar o portátil no tendría la capacidad de procesamiento para crear estos mapas de alta resolución rápidamente. DroneDeploy tiene la potencia del servidor y el ancho de banda para procesar las imágenes en mapas y modelos de alta resolución.

Su solución en línea le permite ver y analizar sus datos en cualquier smartphone u ordenador conectado a Internet. La plataforma DroneDeploy es flexible y puede añadir usuarios para compartir sus modelos. Esto permite la colaboración y las aportaciones de muchas partes si es necesario (Drone Deploy, 2020).

Bajo este contexto, se quiere realizar un análisis desde una mirada espacial que permita entender la realidad de las comunas del secano costero y sus problemas de degradación de paisajes, ofreciendo herramientas que permitan una evaluación espacial y temporal de las dinámicas de los paisajes degradados en la zona del secano costero de la región del Biobío, en especial en la cuenca del Río Clero, en la comuna de Yumbel, para aquello se optó por elegir una cárcava modelo para hacer las estimaciones de pérdida de suelo mediante software de procesamiento de imágenes obtenidos desde

un Dron. Se trata de comparar la pérdida de suelo en un terreno calculada por una parte mediante el método RUSLE (Erosión potencial, pero que no incluye la pérdida de suelo en cárcavas), con el cálculo de software fotogramétricos especializados.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la erodabilidad del suelo de la cuenca del Río Claro estimando, por medio del modelo RUSLE y posteriormente calcular las pérdidas de suelo actual en cárcavas a partir de análisis de imágenes satelitales de alta resolución obtenida de drones.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Evaluar la erosión potencial de la Cuenca del Río Claro a partir de la aplicación del modelo RUSLE.
2. Calcular los volúmenes de suelo que se han movilizado en cárcavas específicas de la cuenca del Río Claro a fin de estimar la pérdida de suelo a escala de detalle.



### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. AREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la cuenca del Río Claro (37° 5' 51.060" S; 72° 38' 1.506" W), emplazada en la Cordillera de la Costa, comuna de Yumbel, Región del Biobío. La superficie de la cuenca es de 904 km<sup>2</sup> (ArcGis 10.1), se encuentra a una altitud de 72 m. s.n.m y posee un caudal ecológico de 5 m<sup>3</sup> por segundo (PLADECO, 2014-2017). El clima en la zona presenta las características de mediterráneo, con veranos de temperaturas elevadas y secas e inviernos lluviosos. Este clima templado se caracteriza por presentar las 4 estaciones del año bien marcadas (Sarricolea et al, 2018).

Otra característica del clima de Yumbel es la mayor continentalidad, por efectos del alejamiento del borde costero y de la barrera climática que impone la Cordillera de la Costa, la cual, a pesar de ser de baja altura, impide el avance de los efectos moderadores y la humedad del mar. Estos factores influyen en que las condiciones especialmente de temperatura, sean de un mayor contraste relativo que en la costa, es decir, posee una mayor amplitud térmica diaria, que se manifiesta en que las temperaturas son más extremas, más bajas en las noches y más altas en el día. La temperatura media anual es de 13,7°, siendo la media del mes más cálido Enero de 20,6° y la media del mes más frío Julio de 8,2°. Yumbel no presenta temperaturas frías tan extremas, sin embargo, son frecuentes las heladas en los meses de Agosto y Septiembre. Las precipitaciones anuales son aproximadamente de 1.303,2 mm., concentrándose el 75% del agua caída en 5 meses, entre Mayo y Septiembre. El mes más seco es Enero con 25,2 mm y el mes más lluvioso es Junio con 256,4 mm (PLADECO, 2014-2017).

Respecto de los vientos predominantes, desde los meses de Septiembre a Marzo predominan los vientos del S y SW de buen tiempo y de Abril a Agosto se desarrollan los vientos Norte que son de mal tiempo en invierno. Además de las heladas que afectan a los cultivos de la zona, los contrastes térmicos y entre invierno y verano y especialmente la concentración de lluvias ya indicada, son el principal factor que influye en la erosión y degradación de los suelos en pendiente de la Cordillera de la Costa de esta comuna (abundante presencia de cárcavas de erosión).

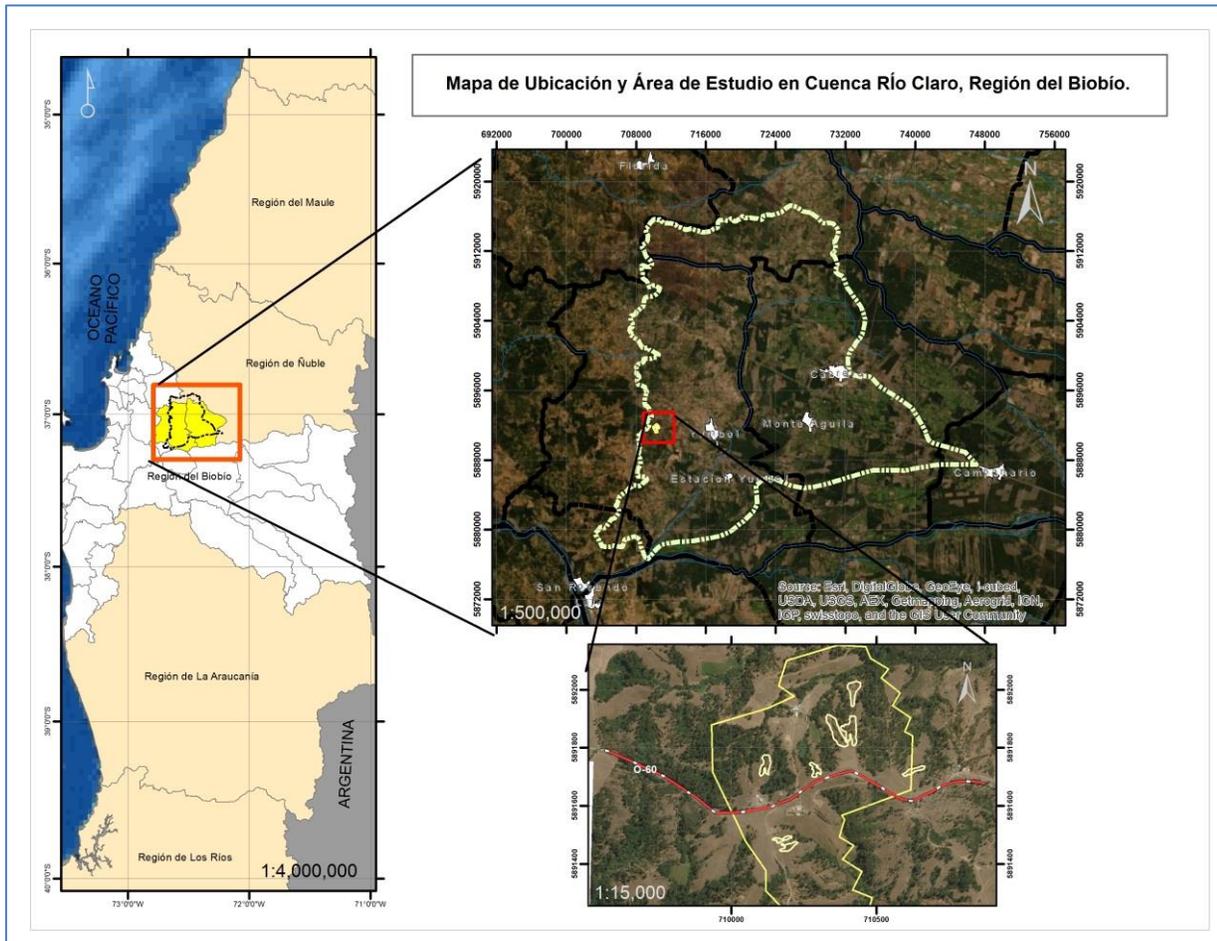
La red hidrográfica tiene origen local, de modo que las aguas de escorrentía superficial y subterránea reciben alimentación esencialmente pluvial. El 85% de las precipitaciones se producen en invierno, en el período de abril a septiembre (González et al., 2000). Desde el punto de vista geomorfológico se encuentra emplazada en la cuarta agrupación regional, correspondiente a la Región central lacustre y del llano glacio-volcánico, Borgel (1983).

El río Claro tiene un régimen de alimentación pluvial y se alimenta de las aguas de la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa y de napas freáticas de la llanura de arenas volcánicas (Mardones et al, 2001). Los aportes o tributarios principales del Río Claro son los esteros Tapihue, Colliguay, Coihuico y Cambrales, este último atraviesa la ciudad de Yumbel, en toda su longitud de norte a sur. Debido a su régimen netamente pluvial, es decir, se alimenta de las lluvias invernales que se concentran entre los meses de Mayo a Septiembre, presenta grandes diferencias de caudal entre invierno y verano. El río Claro, que es el principal curso de agua que atraviesa esta comuna, tiene un trazado norte – sur y separa la Cordillera de La Costa de la Depresión Intermedia o llanura fluvio volcánica (PLADECO, 2014-2017).

Actualmente en la vertiente oriental de la Cordillera de la costa (comuna de Yumbel), predominan praderas, plantaciones forestales exóticas y matorrales. El paisaje se caracteriza por encontrar roca meteorizada a la vista (maicillo) y abundantes zanjas o cárcavas producto de la de erosión. En las quebradas de exposición sur y sectores de mayor humedad hay presencia de renoval nativo esclerófilo de boldos (*Peumus boldus*) y litres (*Lithraea caustica*), aislados y poco denso.

Se destaca que en esta zona posee aproximadamente 21.500 habitantes, donde la actividad agrícola y forestal es la cuarta de mayor preponderancia después de los servicios terciarios (BCN, 2015). Esto repercute y se vincula de manera relevante a los usos de suelo en la zona y la erosión existente en el sector.

Figura 6: Cuenca del río Claro, Región de Biobío



Fuente: Elaboración propia en base a ArcGis Imagery

### 3.2. IMPLEMENTACION DEL SIG

El modelo RUSLE se implementó en SIG utilizando el software ArcGis 10.1 (ESRI, Redlands, California, EE. UU.). Los valores para R, K, L, S, C y P se introdujeron como capas independientes. RUSLE se expresó como una expresión de Álgebra de mapas (Raster Calculator) y se resolvió para cada celda. Esta implementación permite que los valores de los parámetros se modifiquen fácilmente para evaluar los efectos de las cubiertas vegetales alternativas en la erosión del suelo.

### 3.3. CÁLCULO RUSLE

La metodología utilizada en el presente estudio está basada en la erosibilidad de la lluvia, entendida como la capacidad que posee la lluvia para causar pérdida del suelo en las laderas (Nearing et al, 2017). La aplicación de una determinada metodología para predecir o estimar la erosión hídrica, desemboca en la aplicación de modelos complejos que cuantifican los efectos sobre el suelo procedentes de procesos externos, como por ejemplo el agua, que cumple la función de un agente dinámico (Tarbuck & Lutgens, 2005).

El modelo RUSLE utiliza cinco factores como se mencionó anteriormente: erosividad de la lluvia ( $R$ ), erodabilidad del suelo ( $K$ ), longitud y gradiente de la pendiente ( $LS$ ), cubierta y manejo de cultivos y residuos ( $C$ ), y prácticas de conservación ( $P$ ). Para la determinación de los factores de RUSLE, se siguió el siguiente procedimiento:

#### 3.3.1. Cálculo de Factor “R”

El cálculo del factor  $R$  modela los valores de precipitación existentes en la zona de estudio; para tal efecto se calculó la suma anual de los promedios mensuales elevados al cuadrado dividido por la precipitación total anual. Para este estudio se contó con datos de precipitación de siete estaciones (*Chillancito, Las Pataguas, Andalien, Río Laja Ag. Arr. Del Salto (Rec.R. Laja), Pemuco, Cholguán y Laja*). El factor  $R$ , llamado “Factor de la precipitación”, expresa el efecto de erosividad por lluvia en un área (Röder et al, 2006).

#### 3.3.2. Cálculo de Factor “K”

El cálculo del *factor K* está relacionado con la susceptibilidad de la erosión del suelo y la tasa de escorrentía; para tal efecto se utilizó información y datos relacionados a la descripción de suelos proporcionados por el centro de información de recursos naturales (CIREN), de igual forma los valores de permeabilidad y estructura fueron deducidos a partir de la textura de cada una de las series de suelo a través de la Tabla 3 de textura (Mannaerts, 1999) y el nomograma de erodabilidad de suelo (Wischmeier & Smith 1978) (Figura 7).

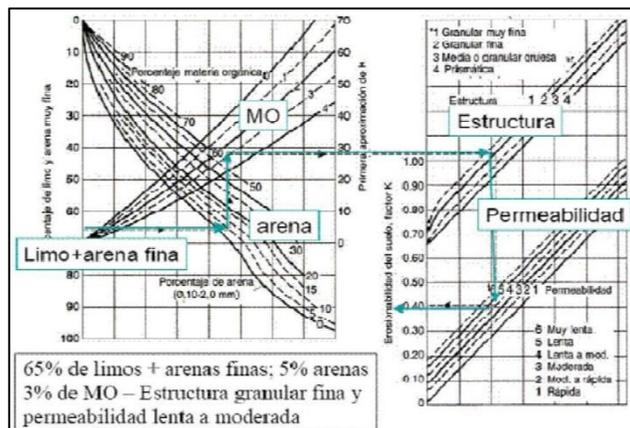
El factor  $K$ , expresa la vulnerabilidad por erosión hídrica de un suelo. De acuerdo a Wischmeier (1978), las características que tienen un impacto importante a la disposición erosiva de un suelo son: a) el contenido [%] limo + arena muy fina (0.002-0.1mm), b) el contenido [%] de arena + arena fina (0.1-2mm), c) el contenido de materia orgánica [%], d) La clase de agregación y e) La permeabilidad (Röder et al, 2006).

**Tabla 3: Textura de Suelo**

Textura clase	Permeabilidad ad código	Conductividad hidráulica saturada [mm/hr]	SCS Grupo Hidrológico de suelo
Arcilla, franco arcilloso	6	<1	D
Arcillo arenoso, franco arcillo limoso	5	1-2	C-D
Franco arcillo arenoso, franco arcilloso	4	2-5	C
Franco limoso, franco	3	5-10	B
Areno francoso, franco arenoso.	2	10-60	A
Arena	1	>60	A

Fuente: Mannaerts, 1999

**Figura 7: Nomograma de Wischmeier para el cálculo del factor de Erodabilidad del suelo (K).**



Fuente: Adaptado por Foster et al. (1981).

### 3.3.3. Cálculo de Factor “LS”

La influencia del relieve en la erosión hídrica se expresa en la ecuación RUSLE a través del factor topográfico, resultante de la combinación del gradiente de la pendiente ( $S$ ) con la longitud de la pendiente ( $L$ ). El factor  $L$  está relacionado con la topografía del sitio, siendo la longitud de la pendiente el factor utilizado. Para la obtención del subfactor  $L$ , es necesario el dato del flujo de acumulación, así como el valor del factor  $m$ . Para obtener el primer dato, utilizo el DTM para el cálculo de la dirección de la pendiente, con este nuevo resultado obtengo el dato de acumulación (Flow Accumulation).

La función “*Flow Accumulation*” simula una corriente de agua desde el punto más alto transfiriendo el valor 1 al punto vecino más bajo, de tal manera que los valores aumentan según disminuye la pendiente (Röder, J et al, 2006). El factor  $S$  está relacionado con la topografía del sitio, siendo el grado de la pendiente el factor utilizado. Finalmente, para calcular el factor combinado  $LS$  se multiplicó cada factores  $L$  y  $S$  utilizando la función algebra de mapas, considerando sustituir los valores de  $S$  a radianes (Rad).

A partir de los avances tecnológicos y la disponibilidad de Modelos Digitales de Elevación (MDE) de la superficie terrestre, la ecuación original para el cálculo del Factor  $LS$  de Wischmeier y Smith (1978) ha sido modificada con la incorporación del impacto de la acumulación o convergencia de flujo (Moore *et al.* 1991, Desmet & Govers 1996).

### 3.3.4. Cálculo de Factor “C”

El factor de cobertura vegetal indica la capacidad de la vegetación para disminuir la fuerza erosiva. Wischmeier (1978) enlista diferentes índices por tipos de cobertura. Para la estimación del factor  $C$  se consideraron siete tipos principales de cobertura del suelo, los cuales fueron extraídos del “*Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile De CONAF– Año 2017*” (Tabla 4). El factor  $C$  está relacionado con la pérdida de suelo de un área y la cobertura específica de la misma, es decir que este factor medirá la influencia de la cobertura vegetal sobre el terreno.

**Tabla 4:** Coberturas de uso de suelo para el área de estudio.

Cobertura	Factor Cobertura	Valor Amplificado
<b>Bosque Adulto</b>	0.001	<b>10</b>
<b>Plantación</b>	0.015	<b>150</b>
<b>Matorral</b>	0.030	<b>300</b>
<b>Agricultura</b>	0.250	<b>2500</b>
<b>Urbano</b>	0.0001	<b>1</b>
<b>Suelo Descubierta</b>	0.495	<b>4950</b>
<b>Agua</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.5. Cálculo de Factor “P”

El factor  $P$  está relacionado con las prácticas de control de erosión y conservación de suelo. En el presente caso de estudio el factor  $P$  tiene un valor de 1, dado que no existe información concerniente a las prácticas de control en la zona. Ni en las cárcavas que fueron seleccionadas para este estudio. Sin embargo, para las zonas en que exista control de erosión, se estimará este factor según corresponda, pero como se determinó un lugar pequeño dentro de la cuenca, el factor  $P$  para este estudio se determinó con valor 1.

### 3.4. ADQUISICIÓN DE DATOS Y GENERACIÓN DE MODELO DIGITAL DE TERRENO.

Se probó la metodología usada por Krenz & Khun (2018), en la cuenca de Karoo en Sudáfrica, en la que se utilizó drones para la generación de DTM de alta resolución. Estos autores realizaron una descripción del hardware de UAV, con la captura de imágenes, la generación de DTM y ortomosaicos y un flujo de trabajo para la estimación de erosión en Badlands con las imágenes adquiridas.

Este trabajo es un método empírico, que se apoya en el trabajo de campo y en las tecnologías de imágenes de alta resolución, con el apoyo del Software de Fotogrametría PIX4DmAPPER Pro, sin embargo en este caso se utilizó un software online similar, llamado DroneDeploy, el cual realiza las mismas funciones del Pix4D y sin necesidad de instalar el software en el PC. Además, se siguió la metodología propuesta por d'Oleire-Oltmanns, et al (2012), que consiste en la utilización de drones para monitorear la erosión del suelo en Marruecos.

### **3.4.1. Factores a tener en cuenta.**

#### **i) Trabajo en Terreno.**

a) Se realizó una identificación de las zonas de estudio, en primera instancia mediante Google Earth Pro y dos visitas a terreno para poder identificar las cárcavas que van a ser utilizadas para la determinación de volúmenes ( $m^3$ ) en una de ellas. Para poder estudiar estos sectores que debían ser tomados en cuenta antes de realizar el vuelo con el UAV se debió identificar los siguientes factores:

- Accesibilidad a las zonas de estudio.
- Identificar zonas de cárcavas en el sector.
- Verificar si existen líneas de transmisión y cables de altas tensión que puedan interferir durante el vuelo.
- Estimar el área a ser levantada.
- Identificar las posibles ubicaciones de los puntos de control sobre el terreno.
- Población cercana para sociabilizar lo que se estaba haciendo.

b) Para el desarrollo del trabajo de campo de este estudio, los equipos necesarios fueron los siguientes:

- Dron DJI Phantom 4 Pro, con fotos con 1/1000 seg de obturación, desde un altura de 90 m metros, con un Overlap de 70% y un Sidelap de 70%. Se tomaron alrededor de 442 fotos en el vuelo.
- Triángulos reflectores (puntos de control).
- Computadora Portátil (Figura 8).

**Figura 8:** Computador Portátil utilizado en terreno



Fuente: Elaboración propia.

c) Plan de Vuelo: se realizó capturando las imágenes con un ángulo de la cámara adecuado, normalmente este ángulo no debe ser perpendicular al suelo, es decir no debe hacer los  $90^\circ$ , garantizando así relieve y la posibilidad de medir cotas y alturas para generar un vuelo tridimensional. Se realizó el recorrido programado tomando las fotografías necesarias y de acuerdo al área a trabajar, al igual que el cumplimiento de superposición en las toma de las fotos.

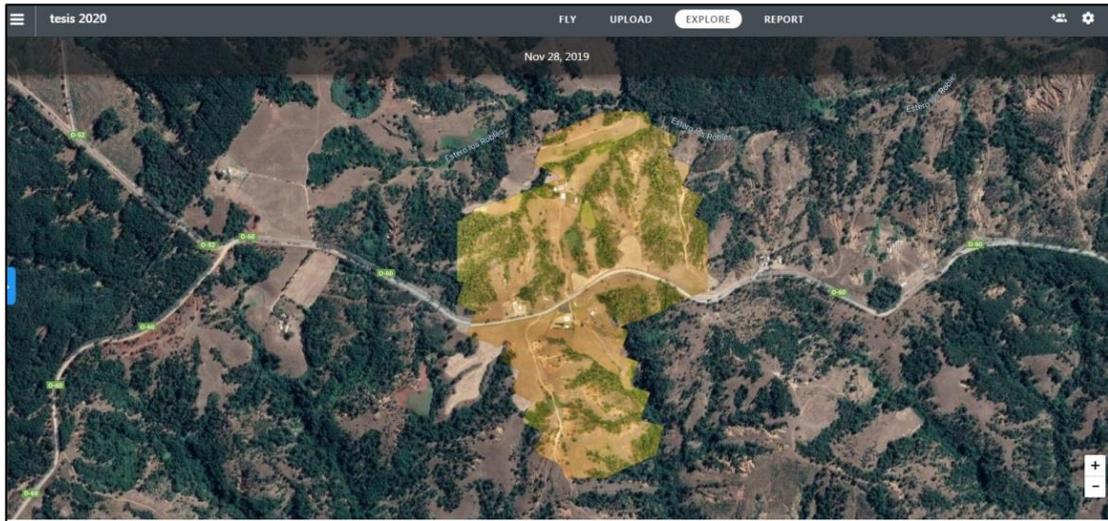
**ii) Trabajo en Gabinete (Procesamiento de Imágenes en Software Drone Deploy).**

a) Se descargaron las fotos obtenidas mediante el Dron para luego ser procesadas en un programa de edición, en este caso se utilizó Drone Deploy. Este software realiza el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y genera datos espaciales en 3D.

b) Al agregar las fotos (442 fotografías) el programa orientó cada foto, dándole una coordenada GPS real, una cota y una altura de vuelo y especificaciones de cámara. Al cargar las fotos, el programa reconoce todos estos datos y orienta las fotos colocándolas de acuerdo a la posición que el Dron las capturó creando un Mosaico de fotografías (Figura 9), mostrando además una nube de puntos densa.

El programa interpreta puntos en común para correlacionarlos, después creó una maya, la cual forma los píxeles de la fotografía y genera un modelo tridimensional, para después crear el Modelo 3D.

**Figura 9:** Visualización de mosaico obtenido en Drone Deploy.



Fuente: Elaboración propia, en base a Drone Deploy.

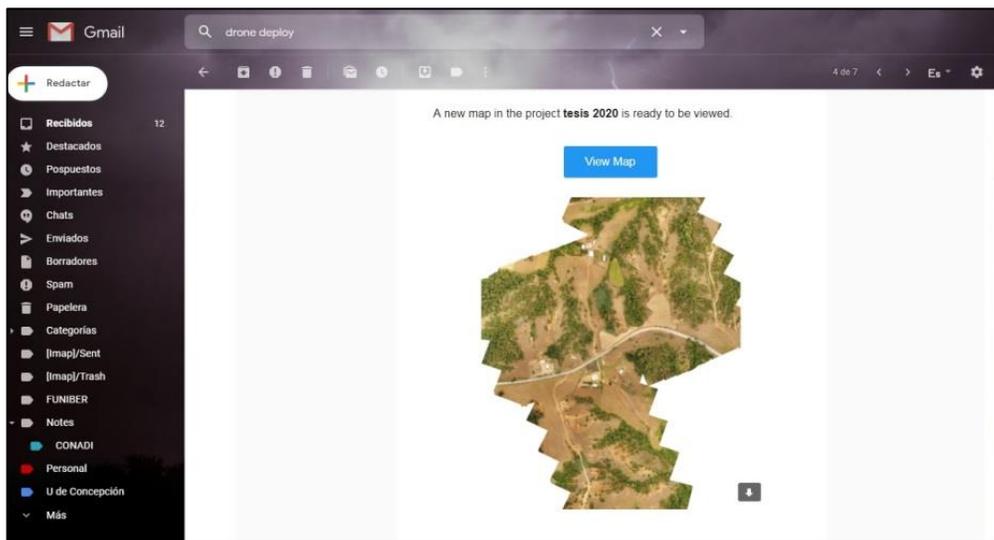
Posteriormente se seleccionó el Tipo de mapa. Drone Deploy entrega dos opciones:

1. **Terreno:** Estos son más adecuados para grandes pistas de tierra, como campos agrícolas o estudios de sitios (Esta será la opción para este estudio).
2. **Estructuras:** Esto está optimizado para edificios, estatuas, objetos y otras estructuras muy tridimensionales. Se recomienda agregar imágenes oblicuas para obtener mejores resultados. Los conjuntos de datos se limitan a 1000 imágenes ([www.dronedeploy.com](http://www.dronedeploy.com))

c) Una vez seleccionadas y cargadas las fotos el software entregó la información sobre el mapa, incluido el área, el tiempo estimado para el proceso y el tamaño de los datos. Las estimaciones de **tiempo de procesamiento** mostrarán el rango de tiempo mínimo esperado y el rango máximo de tiempo esperado, en función de los datos históricos.

Cuando se haya completado el procesamiento (Figura 10), el software notifica por correo electrónico. Hay que considerar que procesar los datos de alta calidad puede tomar hasta unas pocas horas para un trabajo muy grande con imágenes de alta resolución. En promedio, el procesamiento tarda aproximadamente un minuto por imagen. Una vez listo, en el programa se despliega el mapa con el mosaico construido a partir de las imágenes cargadas.

**Figura 10.** Reporte de finalización de procesamiento y entrega de ortomosaico.



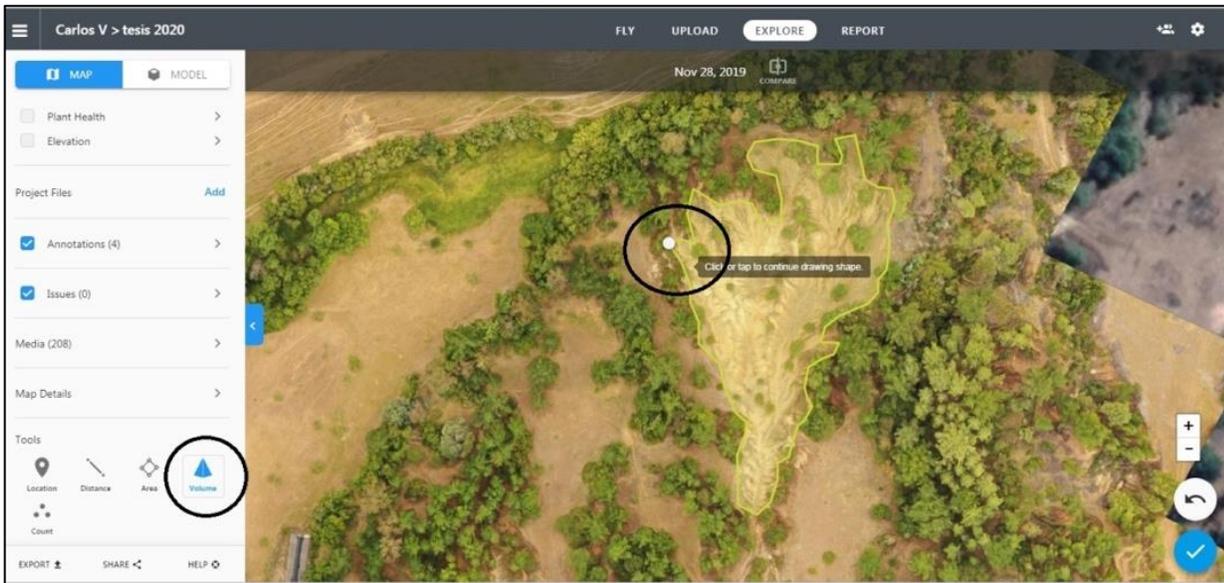
Fuente: Elaboración propia, en base a Drone Deploy.

### 3.5. MODELACIÓN DE LOS VOLÚMENES DE SUELO, EN LA CUENCA DEL RÍO CLARO.

#### a) Selección de área de estudio y estimación de volumen de suelo.

Para estimar el volumen de suelo perdido dentro del área de estudio, se seleccionó una cárcava para realizar esta medición. Para aquello, se digitalizó una cárcava del Mosaico creado en Drone Deploy, esto se realizó agregando los puntos alrededor de la cárcava que se desea calcular el volumen en m<sup>3</sup> (Figura 11).

**Figura 11:** Herramienta de digitalización y cálculo de volumen en Drone Deploy



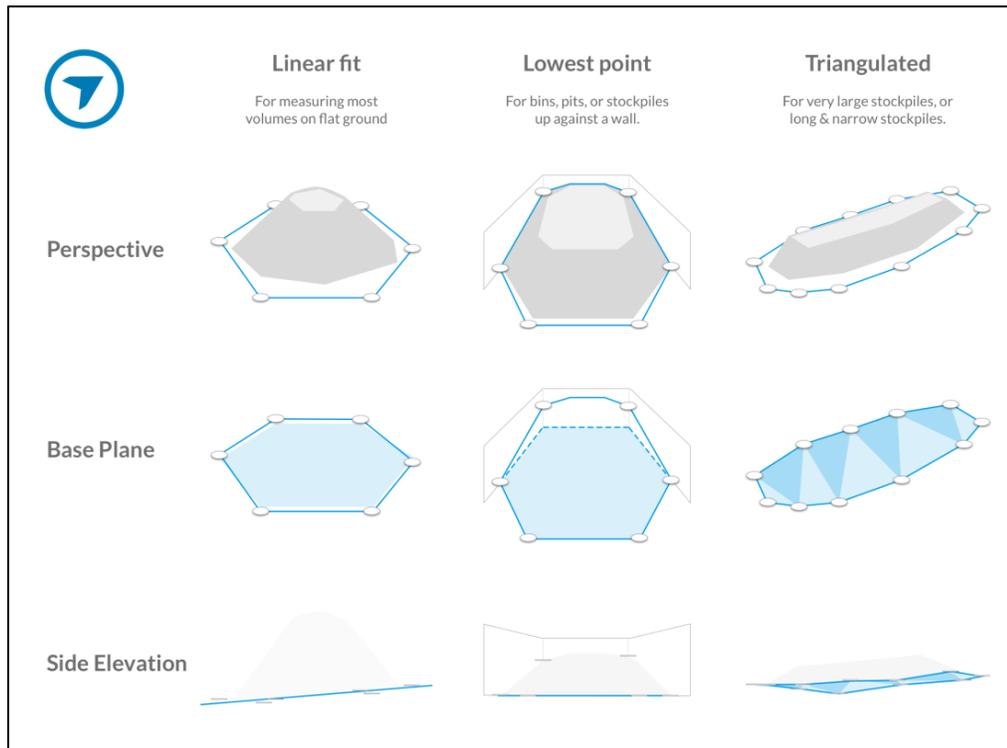
Fuente: Elaboración propia, en base a Drone Deploy.

b) Selección de Plano Base



El software entrega la elección del plano de base adecuado para asegurar de que se está registrando mediciones precisas del cálculo de volumen. Hay tres opciones disponibles para el cálculo de volumen, **Ajuste lineal** (Linear Fit), **Punto más bajo** (Lowest point) y **Triangulado** (Triangulated) (Figura 12).

Figura 12: Opciones de plano para el cálculo de volúmenes.



Fuente: Drone Deploy. ([www.dronedeploy.com](http://www.dronedeploy.com))

- **Linear Fit** (anteriormente "Best Fit") define el plano base ajustando un plano perfectamente plano, en 3D, a través de los puntos de borde elegidos. Es ideal para reservas independientes en la mayoría de las situaciones en terrenos planos.
- **El punto más bajo (Lowest Point)** calcula un plano base horizontal desde el punto de borde más bajo. Esta opción es más adecuada para calcular el volumen de bancos o arsenales en terrenos planos en contenedores, o donde haya pilas vecinas una contra la otra.
- **Triangulado (Triangulated)** une todos los puntos de borde para crear una superficie 3D debajo de su reserva. Esto es perfecto para reservas largas y delgadas, o para grandes reservas de más de 0.5 acres de tamaño.

c) *Comprensión de los Cálculos.*

Los cálculos de volumen entre el plano base y la superficie del terreno de su área de interés se dan en términos del volumen que sería necesario eliminar (en el caso de una reserva) y / o agregarse (en el caso de un agujero) para nivelar la superficie de modo que sea lo mismo que el suelo circundante.

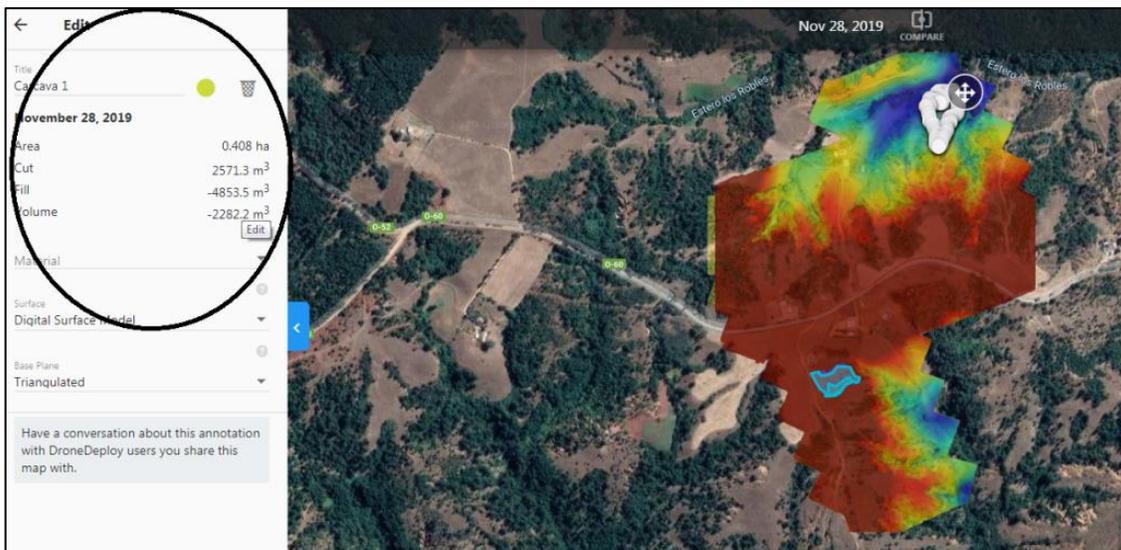
d) *Corte contra relleno*

- **Cortar (Cut)** se refiere al volumen que tendría que quitar del área para nivelarlo.
- **Relleno (Fill)** corresponde al volumen que tendría que arrastrar, para "llenar" un agujero, con el fin de restituir el área.

De esta forma, los volúmenes de corte (Cut) y relleno (Fill) se muestran automáticamente en el mapa al calcular los volúmenes (Figura 13). El cálculo de la medición de **volumen** real es:

$$\text{Volumen (m}^3\text{)} = \text{Cut} - \text{Fill}$$

**Figura 13.** Procedimiento para realizar Cálculo de volumen en Drone Deploy.



Fuente: Elaboración propia, en base a Drone Deploy.

## 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

### 4.1. Resultados de obtenidos para cada uno de los factores del Cálculo de RUSLE.

Al realizar el cálculo de RUSLE, para una cuenca de gran tamaño como es la Cuenca del Río Claro, se asumieron los riesgos y limitaciones que el proceso lleva implícito, para simular una estimación de pérdida de suelos en ella. Tal como lo muestra la Figura 14 los factores fueron calculados de manera individual.

Los valores de  $R$  en el área de estudio van desde los 9.29 en Laja hasta los 19.388 en Cholguán.

Los valores de **erodabilidad**  $K$  para el área de estudio y la capacidad de erosión del suelo varía entre 0.018420 y 0.386071 t ha h ha<sup>-1</sup> MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>. Estudios anteriores han encontrado valores de  $K$  que varían entre 0.022 y 0.040 t ha h ha<sup>-1</sup> MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup> (Honorato *et al.*, 2001).

Los factores  $L$  y  $S$  para el área de estudio tienen valores relativamente altos, principalmente porque la topografía en el área de la cordillera de la costa consiste en colinas y áreas de quebradas y pendientes fuertes. Gran parte del área de estudio tiene valores de  $LS$  de entre 0.03 y 37.18.

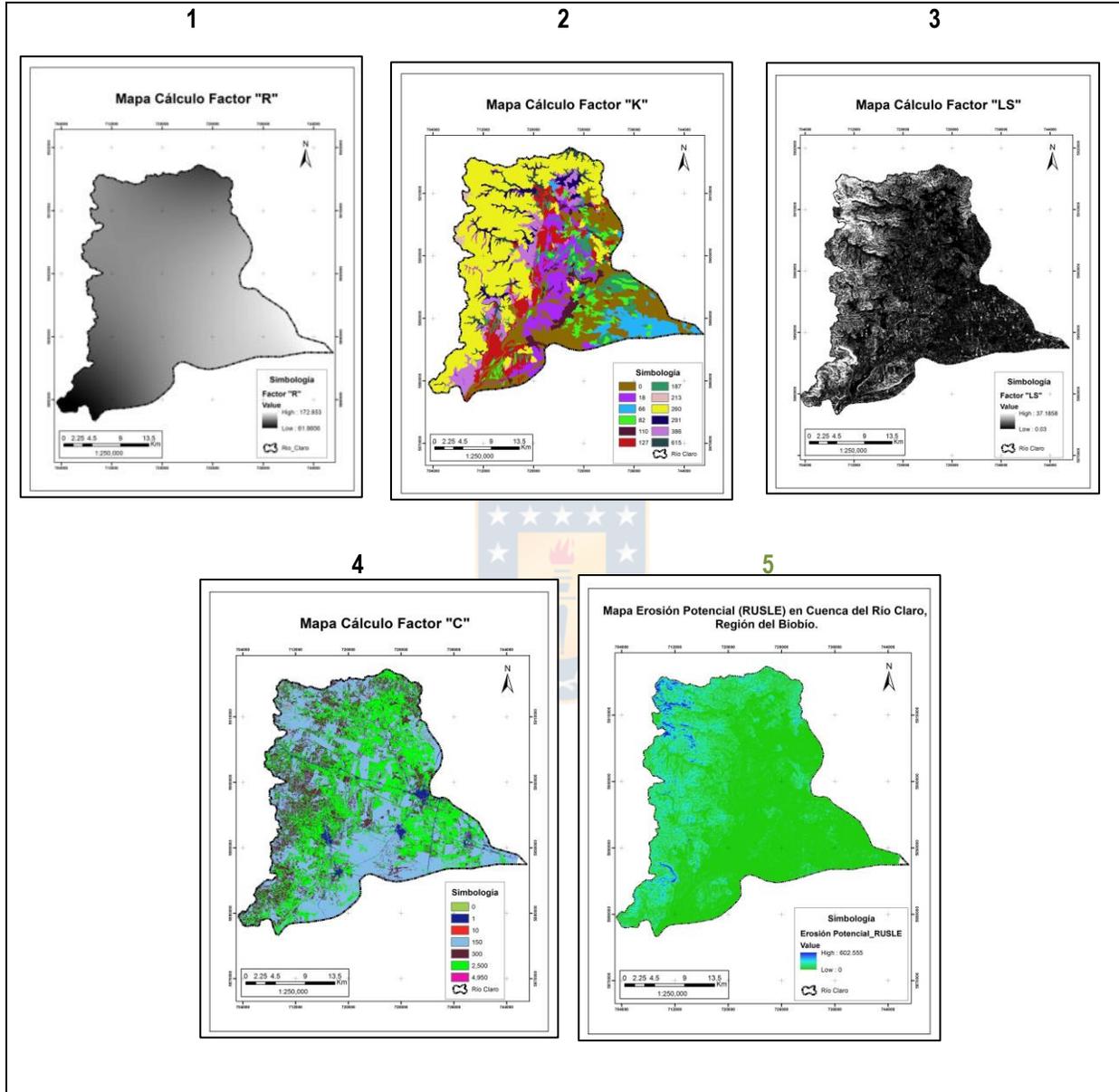
Los valores estimados de  $C$  para el área de estudio son altos, excepto para los bosques adulto con valor 10, zona urbana con valor 1 y agua con valor 0. Los valores de  $C$  para las plantaciones forestales dependen de la edad de los árboles y de las prácticas de manejo forestal. En este estudio, se asumió que los árboles estaban maduros.

El factor  $P$  está relacionado con las prácticas de control de erosión y conservación de suelo. En el presente caso de estudio el factor  $P$  tiene un valor de 1, dado que no existe información concerniente a las prácticas de control en la zona de estudio.

La pérdida de suelo estimada debido a la erosión en las condiciones actuales se muestra en la **Figura 14**, observándose las zonas suroeste de la cuenca con mayor potencial de erosión, con claros signos de avanzada degradación. De este modo el cálculo de erosión actual obtenida de la ecuación de

RUSLE, entregó que la pérdida aproximada de suelo en la cuenca fue de **602.55** toneladas por año.

**Figura 14.** Resultados de cada uno de los factores para el cálculo de RUSLE. 1) Factor R; 2) Factor K; 3) Factor LS; 4) Factor C y 5) Resultado Final.



Fuente: RUSLE resultados del autor.

#### 4.2 Comparación entre datos obtenidos mediante RSULE y lo datos obtenidos en Terreno.

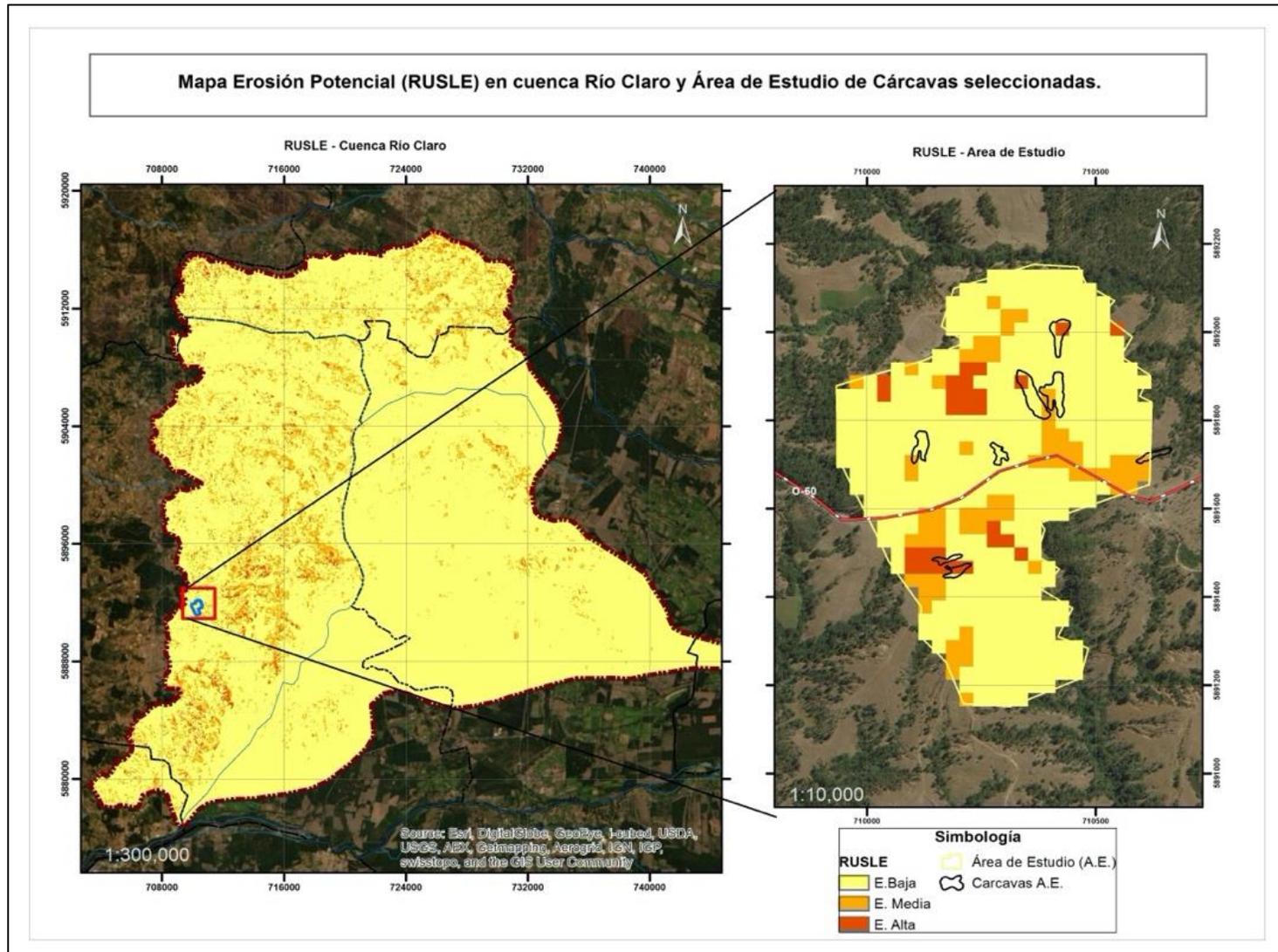
La comparación entre los datos de la erosión actual (RSULE) obtenida mediante el Software ArcGis 10.1 y los datos obtenidos en terreno, permitió verificar la existencia de cárcavas importantes dentro de la cuenca del Río Claro, identificamos así un área de estudio mucho menor al tamaño de la cuenca (Figura 15), de aproximadamente 426.416, 88 m<sup>2</sup> (42 há), en la cual se georeferenciaron y delimitaron las cárcavas presentes en el sector. A continuación, en la Tabla 5, se entregan las coordenadas de las zonas con cárcavas georeferenciadas en terreno donde se selecciona una de ellas para realizar el cálculo de volumen de suelo perdido.

**Tabla 5.** Coordenadas obtenidas en terreno, de zonas de Cárcavas en Área de Estudio.

ID	Coordenada E	Coordenada N
1	710421.6	5891991.45
2	710408.23	5891859.52
3	710408.23	5891859.52
4	710627.42	5891720.39
5	710289.46	5891724.06
6	710117.19	5891739.91
7	710175.05	5891484.6
8	710197.13	5891459.23

Datum WGS 84, 18 H Sur (Elaboración Propia).

Figura 15. Mapa Erosión (RUSLE) en cuenca Río Claro y Área de Estudio de Cárcavas seleccionadas.



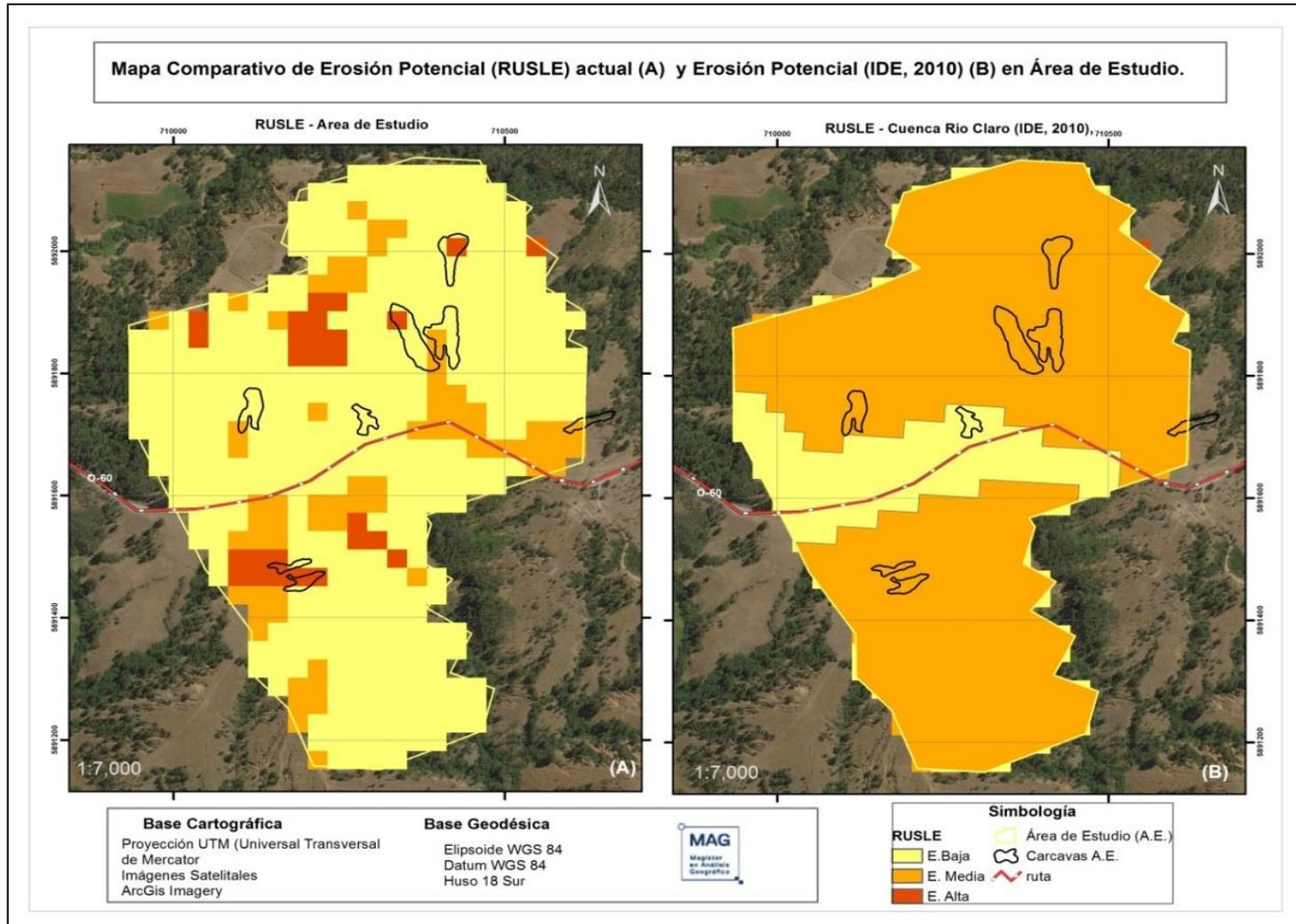
Elaboración Propia, en base a datos obtenidos desde RUSLE.

El Modelo RUSLE, arrojó que los resultados extraídos desde el SIG, mostró una erosión actual con tendencia de erosión “media” a “alta”, la cual se pudo comprobar con los datos obtenidos en terreno, donde claramente existen procesos erosivos importantes en el sector de estudio y coincidían con las cárcavas seleccionadas en esta clasificación.

Por otra parte, con la delimitación de estas cárcavas, y los resultados obtenidos con la ecuación universal RUSLE, en la figura 16, se realizó una comparación, entre la erosión actual entregada por el resultado RUSLE para este estudio con respecto a la erosión actual registrada para la misma zona, a partir de datos obtenidos del 2010, en el portal del IDE (Infraestructura de Datos Geospaciales del Ministerio de Bienes Nacionales).



Figura 16. Mapa Comparativo de Erosión actual (RUSLE) y Erosión Potencial (IDE, 2010) en Área de Estudio.



Elaboración Propia, en base a datos obtenidos desde RUSLE e información de portal [www.ide.cl](http://www.ide.cl)

Como se puede apreciar, el resultado de la distribución espacial de las tasas de erosión (en dos periodos distintos) en el área de estudio. En el área de estudio la tasa de erosión potencial que domina para el año 2019 para este estudio (A) es la *baja* y se distribuye en la mayor parte del área de estudio. Esta erosión está asociada sectores con vegetación (plantaciones de pinos principalmente) y poca pendiente. Le sigue la erosión *media o moderada*, en la cual existen un poco más de pendiente y poca vegetación, aquí se encuentran el mayor número de cárcavas dentro del área de estudio. Y finalmente la tasa de erosión alta se encuentra en menor medida en el área de estudio, pero coincide como muestra la figura 16 con la zona donde se encuentra la cárcava seleccionada para este estudio.

Por otro lado, (B), se visualiza la erosión potencial a partir de los datos entregados por IDE (2020) de la erosión existente en la región del Biobio para el año 2010 y que en gran medida coincide con el cálculo de erosión RUSLE actual, considerando que para el año 2010 (Año de donde se obtienen los datos del IDE), el RUSLE entregado para el área de estudio, la tasa de erosión dominante es la erosión potencial *media*.



Con la identificación de estas zonas de cárcavas en terreno (Tabla 5), se procedió a Delimitar cada una de ellas, para poder luego realizar la comparación de los Datos obtenidos en Terreno, en una pequeña porción de la cuenca del Río Claro, con los obtenidos de erosión potencial en RUSLE.

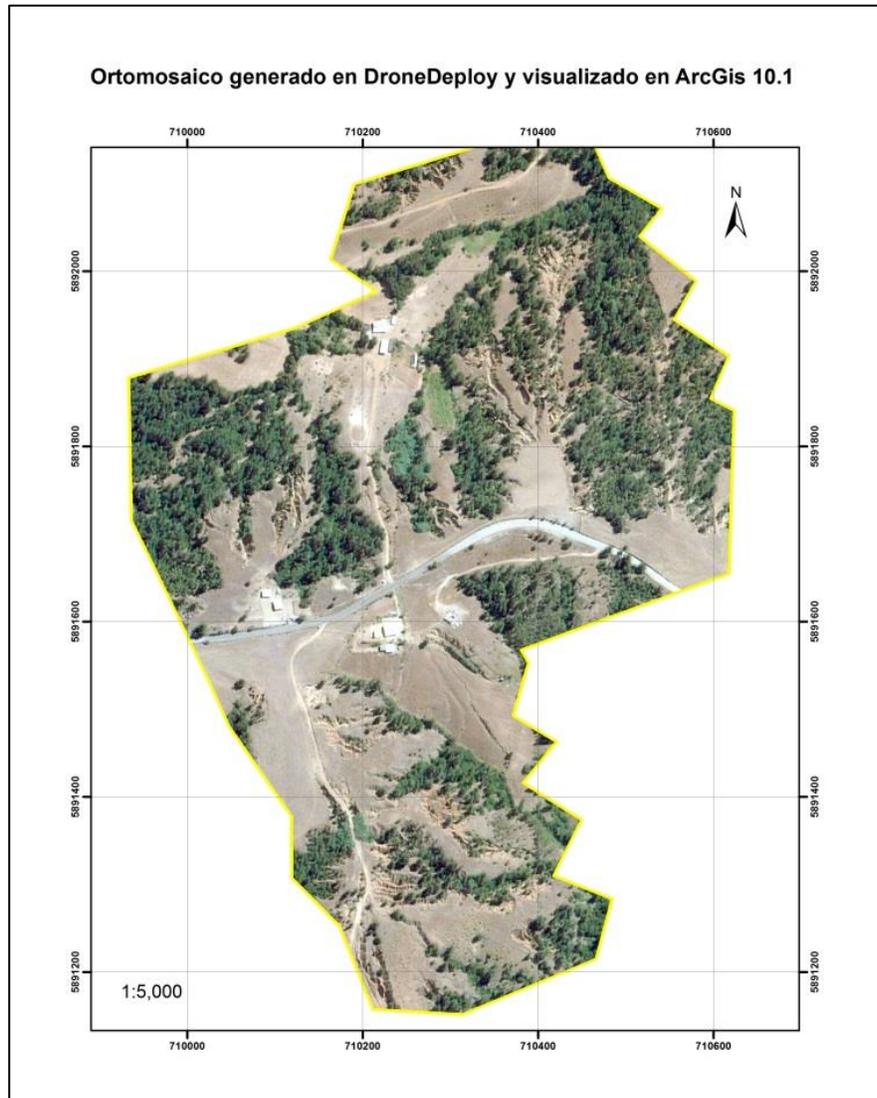
### **4.3 Clasificación y Procesamiento de Imágenes obtenidas con Dron.**

#### **4.3.1 Ortomosaico e índices**

Esta etapa del procesamiento comprendió la creación del modelo digital del terreno, el ortomosaico y los índices de mapa, a partir de las imágenes rectificadas y de los puntos generados en el procesamiento inicial y en la densificación de la nube, lo cual permitió más adelante calcular el volumen de suelo perdido en la cárcava seleccionada.

El ortomosaico es el producto más esperado en el proceso fotogramétrico, ya que este es una representación cartográfica del área de estudio creada a partir de las imágenes aéreas obtenidas en terreno, mediante el Dron. La sección específica seleccionada del terreno corresponde a una vista de la parte inferior del ortomosaico, en donde se ubica la cárcava seleccionada (Figura 18).

**Figura 17.** Ortomosaico visualizado en ArcGis 10.1.



Fuente: Elaboración propia, en base a Drone Deploy y ArcGis 10.1

**Figura 18.** Vista general de Cárcava seleccionada en Ortomosaico.

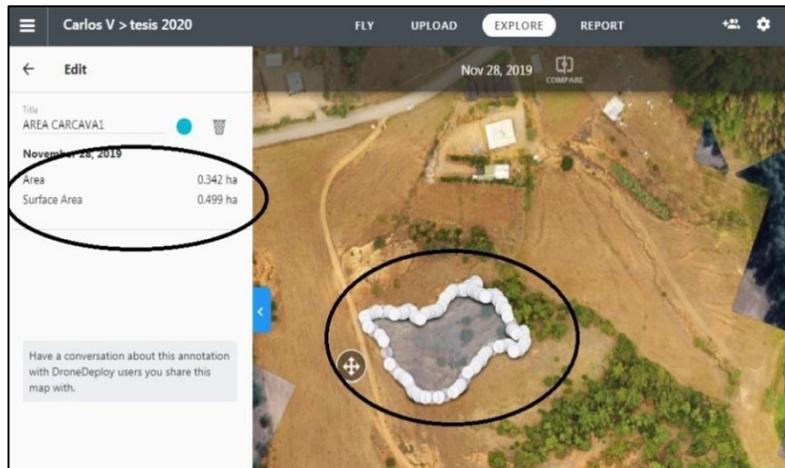


Fuente: Elaboración propia, en base a Drone Deploy.

#### 4.3.2 Cálculo de Áreas

Al delimitar la cárcava seleccionada en el Programa Drone Deploy, este arrojó que la superficie de la cárcavas es de 0.342 ha (Figura 19).

**Figura 19.** Calculo de Área (ha) en cárcava seleccionada.



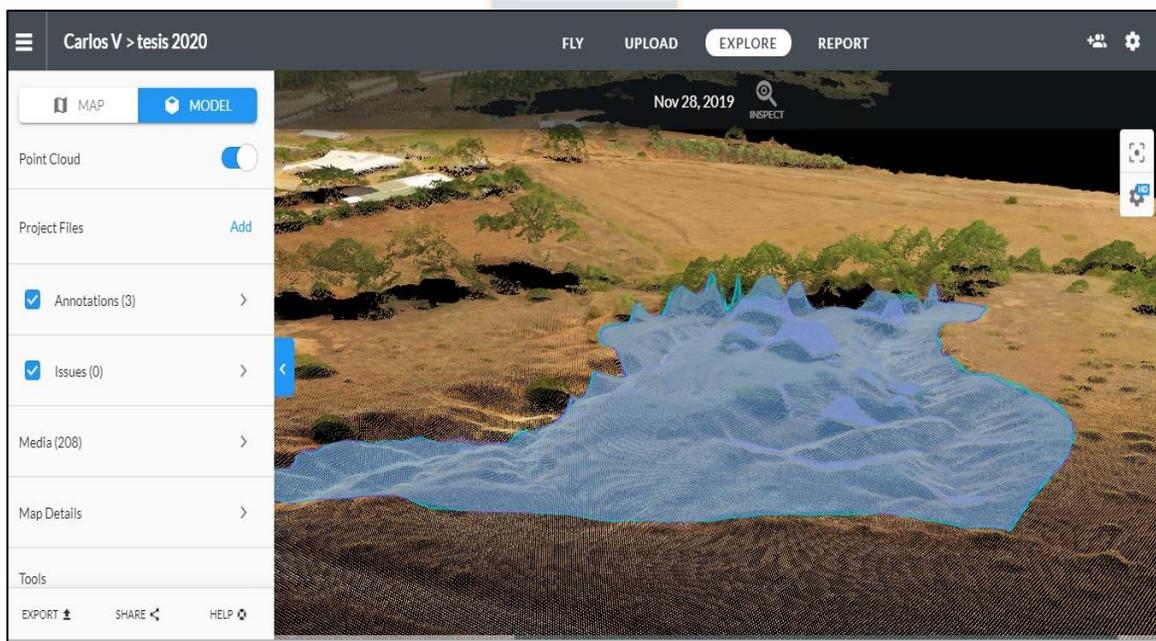
Fuente: Elaboración propia, en base a Drone Deploy.

### 4.3.3 Cálculo de volumen.

El cálculo de volumen, se realizó en *Drone Deploy* sobre el ortomosaico, principalmente por la vista de este siempre mostrará una mejor representación visual del terreno sobre el que se está trabajando. Además, otro factor a tomar en cuenta para realizar el cálculo de volumen, es que se requiere que sean generados todos los productos del procesamiento para hacer uso de esta herramienta (ortomosaico, Modelo 3D, área, etc.).

Uno de estos productos es el Modelo 3D con Nubes de Puntos (Point Cloud), como lo muestra la Figura 20 en la cual se puede observar la delimitación de la cárcava con esta nube de puntos lo que entrega Drone Deploy, esto se realizó anterior al cálculo final de volumen, el cual hace más precisó este cálculo.

Figura 20. Cárcava delimitada con nube Puntos.

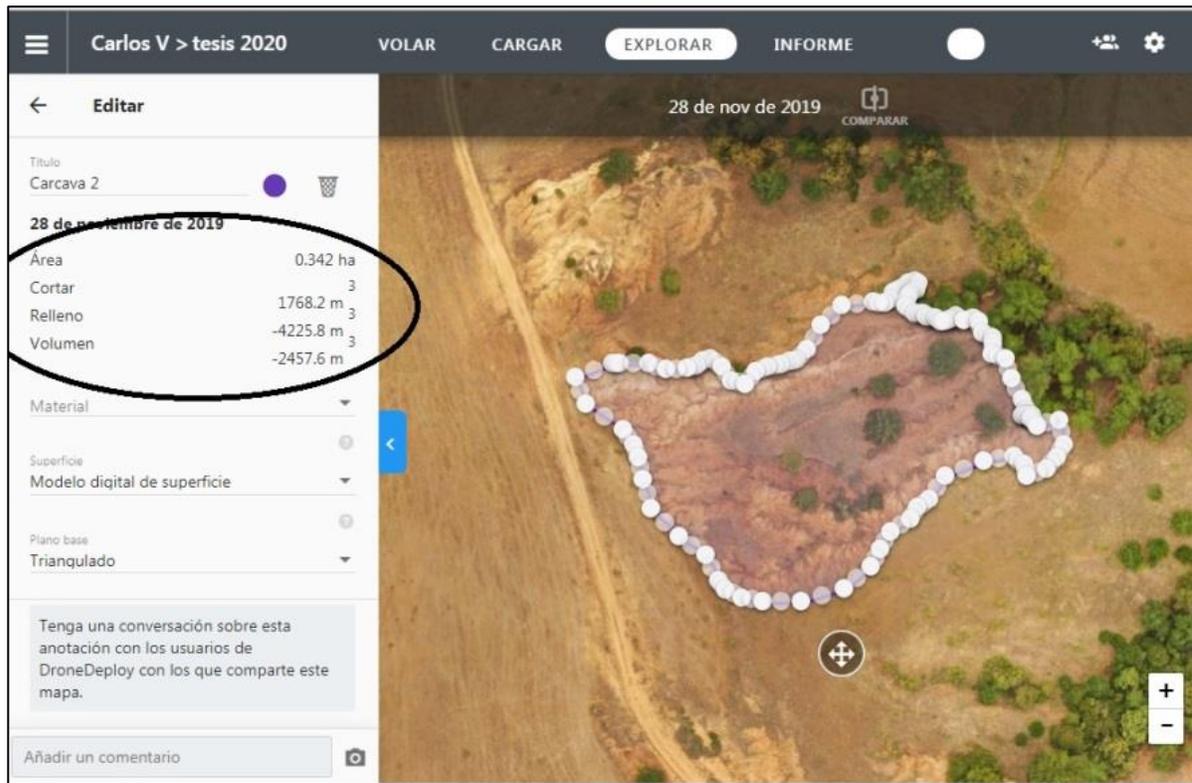


Fuente: Elaboración propia, en base a Drone Deploy.

Finalmente, al delimitar en Drone Deploy, este automáticamente calculó el volumen de suelo perdido o que se necesita para rellenar la cárcava seleccionada. Entregó 4 resultados que se muestran en el visualizador del Programa: Área, Cut (Cortar), Fill (Relleno) y Volumen total. Este cálculo se realizó sobre el DSM (Digital Surface Model).

De esta forma, el volumen de suelo movilizado desde la cárcava seleccionada es de **2.457 m<sup>3</sup>** (-2.547 m<sup>3</sup>), producto de la erosión a la que se ha visto expuesta los últimos años esta zona.

**Figura 21.** Cálculo de Volumen perdido en cárcava seleccionada.



Fuente: Elaboración propia, en base a Drone Deploy.

A continuación, en la figura 22 se visualiza la cárcava seleccionada en terreno, obtenida desde un Dron.

**Figura 22.** Imagen obtenida desde el Dron, de la cárcava seleccionada para el estudio.



Fuente: Elaboración propia, a partir de las imágenes obtenidas con el Dron



## 5. DISCUSIÓN

Se puede considerar este estudio basado en RUSLE como un modelo predecible de erosión potencial y actual en la cuenca en estudio. Röder et al (2006), señala esto siempre cuando, son consideradas las acciones de protección del suelo, adaptando al Factor  $P$ , aplicándolos para toda el área o en zonas específicas dependiendo del objetivo o fines de la investigación. Como ocurre en este estudio, que si bien se calculó la pérdida de suelo actual para toda la cuenca, esta podría realizarse para sectores de la cuenca o micro cuencas presentes dentro de ella, para tener un resultado tal vez más fidedigno con la realidad.

Sin embargo, hay que considerar que una de las condiciones básicas para que este modelo de pronóstico sea capaz de estimar adecuadamente la pérdida de suelo, es que las condiciones hidroecológicas, sean favorables a un desarrollo significativo de la erosión por escurrimiento hídrico, como ocurre en el caso de las cárcavas seleccionadas dentro del área de estudio.

Este cálculo de RUSLE, proporciona una base importante para la planificación de obras de protección del suelo en la cuenca seleccionada (Río Claro), ya que su aplicación es sencilla y factible para la estimación de la disminución esperada de pérdida de suelo por la aplicación de distintas acciones de protección.

Bonilla et al, 2010, señala que en las condiciones actuales, las bajas tasas de erosión ocurren en áreas de suaves pendientes y vegetación, como plantaciones forestales, que proporcionan una protección adecuada del suelo. Las tasas de erosión intermedia ocurren en áreas de pendientes más pronunciadas, terreno ondulado y cubierta vegetal, como pastizales, lo que proporciona cierta protección. Las altas tasas de erosión ocurren en laderas empinadas ( $> 25\%$ ), terreno ondulado, cubierta vegetal degradada (bosque nativo escaso, maleza suculenta y mixta) y en tierras dedicadas a agricultura. Tales características, implican un alto riesgo al desarrollo de procesos de erosión, debido a la morfología del terreno, ya sea por sus pendientes que aumentan la escorrentía y el transporte de material.

Al definir capas de diferentes cubiertas vegetales en el SIG, se determinó que las tasas de pérdida de suelo para el área de la cuenca del Río Claro podrían reducirse a un nivel que afectaría la productividad del suelo a largo plazo. Se recomienda prácticas de conservación del suelo en áreas agrícolas y al plantar especies forestales de rápido crecimiento demostradas para el control de la erosión. Sobre todo, considerando que el hombre es la causa principal de la erosión y degradación de los suelos (al igual que en el área de estudio), ya que a través de sus actividades para obtener sustento, va modificando y alterando los sistemas ecológicos, que en el caso del área de estudio se ha manifestado a través de la agricultura, la ganadería y la actividad forestal. Su deterioro, tiene consecuencias perjudiciales para las poblaciones humanas en distintas escalas espacio-temporales, fundamentalmente debido a la pérdida de su capacidad productiva (Oyarzún 1993, en Peña-Cortés et al. 2006, Peña-Cortés et al. 2009).

Este deterioro comienza a fines del siglo XVI, con la llegada de los españoles se instaló un modelo hispano agropecuario, el cual ya a fines del siglo XVII, empezó a generar cambios en la estructuración del paisaje ecológico. La degradación de los suelos de la Cordillera de la Costa comenzó a intensificarse debido a las inadecuadas prácticas agrícolas (cereales de secano y barbecho), las cuales no ofrecen protección alguna en los meses más lluviosos (Peña, 1999).

Por otra parte, los valores de  $R$  en el área de estudio van desde 9.29 en Laja hasta los 19.388 en Cholguan, los cuales resultaron muy similares o inferiores a otras estimaciones para el centro sur de Chile. En contraste a esto, Honorato *et al* (2001) informaron valores de  $800 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  para Chile central y  $2000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  para el sur de Chile. Y para los factores  $L$  y  $S$  en el área de estudio se obtuvieron valores relativamente altos, principalmente porque la topografía en el área de la cordillera de la costa consiste en colinas y áreas de quebradas y pendientes fuertes. De este modo, gran parte del área de estudio tiene valores de  $LS$  de entre 0.03 y 37.18. Estos valores de  $LS$  resultaron similares a los reportados por Honorato *et al* (2001) para las regiones central y sur de Chile.

- *Estimación de pérdida de Suelo mediante UAV*

Krenz & Khun (2018) determinaron si los UAV (Drones) se pueden utilizar para evaluar “Badlands” como fuentes de sedimentos, mediante la obtención de imágenes de alta resolución, en los cuales se indica que son aptas para identificar, mapear y cuantificar a estas tierras. De esta manera, se justifica la utilización de drones en el estudio, considerando que el uso de estos UAV son menos costosos que otros métodos de obtención de imágenes satelitales, ya que consumen mucho tiempo y la insuficiente disponibilidad de datos o la calidad de las imágenes de resolución aproximada de los sistemas satelitales o aéreos. Además, la adquisición de imágenes de UAV está menos influida por las obstrucciones porque el campo de visión no es estacionario como ocurre con los escáneres lasers o imágenes satelitales. (Brodu & Lague, 2012).

Los UAV o drones son bastantes económicos y permiten adquisición rápido de datos y la generación de datos específicos como los modelos digitales de superficie o terreno (DSM / DTM), ortomosaicos o mapas NDVI.

Por otra parte, Krenz & Khun (2018) señalan que la estimación del volumen de sedimento en Badlands, se podría hacer, en teoría, estimando el volumen de material que se ha erosionado desde que se inició ese proceso hace varias décadas. Sin embargo, la resolución espacial de los servicios disponibles como el Modelo digital de Terreno de código abierto SRTM (DTM) del US Geological Survey (30m x 30m) generalmente no es suficiente para calcular con precisión las pérdidas de sedimentos (Labliberte et al 2011). No obstante existen software (PIX4D o Drone Deploy) que si bien son licenciados tienen periodos de prueba donde se puede trabajar con todas las aplicaciones que ellos poseen. Como fue en el caso de este proyecto.

Se utilizó Drone Deploy, el cual nos entregó todos los componentes que se necesitaban para realizar los cálculos de volumen de suelo perdido en la cárcava seleccionada. Si bien el resultado entrega un resultado de estimación de volumen, que se calcula al delimitar la superficie de la cárcava en el ortomosaico, depende mucho su confiabilidad en la destreza y capacidad de la persona que este digitalizando el área sobre el mapa.

Existen estudios de medición de erosión en cárcavas por medio de imágenes satelitales como lo menciona Rivera *et al* (2014), pero se basan en estimar la erosión en cabeceras de cárcavas, durante un periodo de tiempo (2003-2010) utilizando imágenes de satélite entre esos años. Calculando el crecimiento de la cárcava en estudio y el volumen de suelo periodo en ese periodo, a su vez el estudio realizado en la cuenca del Rio Claro, se estimó el volumen perdido actualmente y no de forma temporal, lo que nos hubiera entregado datos de progresión de erosión en el sector.

Ranghu *et al* (2016) realizaron los primeros en intentar mapear y monitorear la erosión de las quebradas a múltiples escala combinando imágenes de satélite y UAV (Drones). En el cual, al igual que los datos entregados por Drone Deploy utilizado en nuestro estudio (Ortomosaico, Modelo 3D, etc.), las imágenes de UAV combinadas con la foto-reconstrucción en 3D proporcionaron DSM y datos de ortoimagen a nivel de un centímetro en nuestro caso las curvas de nivel creadas por el software fueron de 0.25 metros, así como un modelo 3D. Los productos presentados por Ranghu *et al* (20016) al igual que en nuestro estudio revelaron la erosión hídrica en detalle y proporcionando finalmente el volumen del barranco o cárcava.

En el mismo estudio de Ranghu *et al* (2016) se utilizó como área de estudio la cuenca del río Sancha, para el cual utilizaron para obtener las fuentes los datos de detección, imágenes de satélite y sobre todo de UAV simultáneamente, que entregaron como resultado una evaluación efectiva de erosión de barrancos en múltiples escalas. Nosotros solamente utilizamos las imágenes obtenidas por el Dron, tal vez habernos apoyado en imágenes satelitales se podría haber comparados ambas tecnologías para el cálculo de volumen perdido en la cuenca seleccionada- Este tipo de trabajos ofrece la posibilidad a los responsables políticos desarrollar planes integrales sostenibles de gestión de la conservación del suelo y el agua en el área de estudio. Por lo tanto, la fotogrametría de UAV posee varios campos de aplicación, además de la de obtención de volúmenes de las cárcavas presente en este estudio.

El método propuesto presenta varias ventajas. Primero, la información derivada del DEM de alta resolución y los ortomosaicos se utilizaron por completo, lo que está en línea con la nueva tendencia de desarrollo, considerando que el software Drone Deploy entrega todos estos resultados una vez procesadas las imágenes que se obtuvieron en el vuelo. Segundo, el método propuesto, posee un flujo de trabajo general, que puede ser expandido a otras cuencas fácilmente dañadas con pérdida de suelo por cárcavas. Además, el enfoque del estudio puede soportar una clasificación jerárquica; en consecuencia, se pueden extraer tanto las zonas afectadas por las cárcavas como por las cárcavas independientes.



## 6. CONCLUSIONES

La implementación de RUSLE en SIG permitió una evaluación rápida de diversos escenarios diseñados para reducir las tasas de pérdida de suelo existentes en la cuenca del Río Claro. Sin embargo, este cálculo es propenso a errores. Aunque para este caso, el cálculo de la erosión potencial se acercó bastante al actual en la zona de estudio.

Los valores de la pérdida potencial del suelo no deben interpretarse como valores absolutos, sino como valores de estimación, ya que la ecuación RUSLE no fue desarrollada para aplicarse bajo escenarios extremos de topografía; no obstante permite identificar y evaluar de manera aproximada el estado de peligro o riesgo de áreas susceptibles a la erosión como es el caso de la cuenca del Río Claro.

Este cálculo de RUSLE, proporcionó una base importante para la planificación de obras de protección del suelo en la cuenca seleccionada (Río Claro), ya que su aplicación es sencilla y factible para la estimación de la disminución esperada de pérdida de suelo por la aplicación de distintas acciones de protección.

Por otra parte, los valores de  $R$  en el área de estudio van desde 9.29 en Laja hasta los 19.388 en Cholguan, los cuales resultaron muy similares o inferiores a otras estimaciones para el centro sur de Chile. Para los factores  $L$  y  $S$  en el área de estudio se obtuvieron valores relativamente altos, principalmente porque la topografía en el área de la cordillera de la costa consiste en colinas y áreas de quebradas y pendientes fuertes.

De este modo, gran parte del área de estudio tiene valores de  $LS$ , valores similares a los reportados para las regiones central y sur de Chile.

Si bien el resultado del cálculo de RUSLE para la cuenca del Río Claro, indicó que se trata de una cuenca con erosión baja (70%) en la mayor parte de su superficie, existe un porcentaje igual preocupante que va desde *erosión media a alta*, tal como se pudo observar en la figura 15 al ser comparada la cuenca con la cárcava seleccionada (Área de Estudio).

Además, el cálculo realizado de erosión actual para la cuenca del Río Claro indica una “erosión Alta” (10% de la superficie) coincidente con lo observado en terreno (área de estudio), donde se pudo apreciar un alto grado de erosión hídrica (Figura 15). La estimación del cálculo de la erosión actual (RUSLE) dio como resultado pérdida de suelo, debido a la erosión existente en las condiciones actuales, observándose las zonas suroeste con mayor potencial de erosión, dando como resultado una pérdida de suelo de **602.55** ton/ha por año en la cuenca del Río Claro.

Por otra parte, se utilizó Drone Deploy, el cual nos entregó todos los componentes que se necesitaban para realizar los cálculos de volumen de suelo perdido en la cárcava seleccionada. Si bien el resultado entrega un volumen (2.547 m<sup>3</sup>), que se calcula al delimitar la superficie de la cárcava en el ortomosaico, depende mucho su confiabilidad en la destreza y capacidad de la persona que este digitalizando el área sobre el mapa. Esta aplicación logra procesar las imágenes capturadas por el Dron (UAV) convirtiéndolas fácilmente en mapas 2D, 3D modelos digitales entre otros.

El método propuesto presenta varias ventajas. Primero, la información derivada del DEM de alta resolución y los ortomosaicos se utilizaron por completo, lo que está en línea con la nueva tendencia de desarrollo, considerando que el software Drone Deploy entrega todos estos resultados una vez procesadas las imágenes que se obtuvieron en el vuelo. Segundo, el método propuesto, posee un flujo de trabajo general, que puede ser expandido a otras cuencas fácilmente dañadas con pérdida de suelo por cárcavas. Además, el enfoque del estudio puede soportar una clasificación jerárquica; en consecuencia, se pueden extraer tanto las zonas afectadas por las cárcavas como por las cárcavas independientes.

La integración de todos estos parámetros (RUSLE y Drones) en un SIG ofrece la posibilidad de actualización de datos e incorporación de nuevos, para validar propuestas de uso, gestión y conservación de un territorio degradado, como en el caso de la cuenca del Río Claro. Es importante, indicar que establecer criterios de potencialidad en caso que no se trabaje con cobertura vegetacionales en el Cálculo del RUSLE, e integrarlos en el SIG permitirá detectar la respuesta que ejercería esta zona a otras intervenciones antrópicas. Por lo tanto, los SIG en conjunto con la tecnología de obtención de imágenes mediante drones constituye una herramienta indispensable y a bajo costo para procesos de gestión y decisión territorial.

- *Consideraciones Finales*

La erosión de los suelos en la cuenca del Río Claro y en el área de estudio es un problema grave que debe ser atendido a la mayor brevedad ya que de no hacerlo, en un tiempo relativamente corto, la mayoría de las tierras cultivadas podrían perderse irreversiblemente, considerando que el 70% de la cuenca corresponde a suelos arcillosos de origen granítico altamente susceptibles a la erosión y el 30% restante a suelos arenosos. Las capacidades de uso del suelo predominan las clases V, VI y VII, es decir, suelos en lomaje, delgados y poco adecuados para la agricultura. Un alto porcentaje de los suelos están clasificados con erosión de media a severa, debido al uso indiscriminado que se les da debido al desconocimiento de prácticas de manejo predial que sean sustentables (cultivos en favor de la pendiente, sobrepastoreo, barbechos desnudos, quemas y desforestación, presencia continua de zanjas y cárcavas), y por factores de tipo socioeconómicos asociados a los pequeños predios, pobreza y marginación social, junto con las características de fragilidad propias de nuestros suelos.

Para detener el problema de erosión, se deben diseñar y realizar prácticas de conservación de los suelos que prevengan los procesos de erosión y que permitan restaurar parte de las tierras degradadas, considerando que la aparición de la erosión en cárcavas, guarda en gran medida relación con prácticas inadecuadas de utilización del suelo. Además, la erosión en cárcavas reviste especial atención, entre otras, por las siguientes razones: difícil y costoso control si no se acometen acciones a tiempo; elevadas pérdidas de suelo y contaminación de cuerpos de agua; afectación negativa al recurso paisajístico; y pérdida de capacidad productiva de las tierras, y con ello dificultades económicas para las personas que dependen de ellas.

De esta forma, la obtención de imágenes de alta resolución espacial mediante drones, es un método más rápido y menos costoso que la obtención de imágenes satelitales, a la hora de desarrollar proyectos de estimación de pérdida de suelo en diferentes cuencas de la región y del país y que ayudaría a determinar las pérdidas de suelo, sobre todo en zonas con alta presencia de cárcavas producto de la erosión hídrica.

Finalmente, se sugiere la definición de mayores puntos de control en aquellas áreas que carecen de estos, a fin de generar una distribución mejor y con ello obtener mejores resultados del proceso fotogramétrico y de los cálculos de pérdida de suelo para estos sectores.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- ALBA, S., ALCÁZAR, M., CERMEÑO, F., & BARBERO, F. (2011). Erosión y manejo del suelo. Importancia del laboreo ante los procesos erosivos naturales y antrópicos. *Agrícola ecológica* (1), 13-38.
- ANAYA M., GARCÍA LAGOS R. & FERNÁNDEZ LIRA E (1977). Manual de conservación del suelo y del agua. Escuela Nacional de Agricultura, Colegio de Postgraduados, Dirección General de Conservación del Suelo y Agua. México, D. F.
- BARRIENTOS A, DEL CERRO J, GUTIERREZ P, SAN MARTIN R & ROSSI C (2007). Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones. En II Congreso Español de Informática. En Zaragoza, España del 11 al 19 de Septiembre (p.29)
- BCN. (2015). Biblioteca del Congreso Nacional. Obtenido de Reportes estadísticos comunales Yumbel:  
[https://reportescomunales.bcn.cl/2015/index.php/Yumbel#Poblaci.C3.B3n\\_total\\_a.C3.B1o\\_2002\\_y\\_proyecci.C3.B3n\\_de\\_poblaci.C3.B3n\\_a.C3.B1o\\_2015](https://reportescomunales.bcn.cl/2015/index.php/Yumbel#Poblaci.C3.B3n_total_a.C3.B1o_2002_y_proyecci.C3.B3n_de_poblaci.C3.B3n_a.C3.B1o_2015)
- BONILLA C., REYES L & MAGRI A. (2010). Water Erosion Prediction Using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS Framework, Central Chile. *Chilean J. Agric. Res.* [online]. 2010, vol.70, n.1 [citado 2020-03-23], pp.159-169.
- BORGEL, R. (1983). Geomorfología. Santiago de Chile: IGM.
- BREA, J., & BALOCCHI, F. (2010). Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas. Talca: UNESCO.
- BRODU N & LAGUE D (2012). 3D terrestrial LiDAR data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: applications in geomorphology. May 2012. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensin*
- CAIRNS, I.; HANDYSIDE, B.; HARRIS, M.; LAMBRESCHTSEN, N. (2001). Soil conservation technical handbook. (en línea). Wellington, Nueva Zelanda.
- CENTRO DE ANÁLISIS Y POLÍTICAS PÚBLICAS (2013). Estado del Medio Ambiente en Chile 2012. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- CLEMENS G; FIEDLER S, DINH CONG N; VAN DUNG N.; SHULER U & STAHR K (2010). Soil Fertility Affectewd by Land Use History, Relief Position and Parent Material Under a Tropical Climate in NW-Vietnam, *Catena* 81: 87-96.

- CUERNO, C (2015). Origen y desarrollo de sistemas de aeronaves pilotadas por control remoto. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil (pp. 15-32). Madrid, España: Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid.
- DGA. (2004). Evaluación de los recursos hídricos superficiales de la cuenca del Río Bío Bío. Santiago de Chile: MOP.
- D'OLEIRE-OLTMANN, S, MARZOLFF, I; PETER, K.D & RIES, J. (2012). Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco. 28 pp. Journal Remote Sensing, ISSN 2072-4292.
- ENDLICHER, W. (1988). El Problema de la Erosión del Suelo en la Cordillera de la Costa de la Octava Región. Revista Geográfica del Norte Grande (15), 11-27.
- ELLIES, A. (2000). Soil erosion and its control in Chile. Acta Geológica Hispánica 35(3-4): 279-284.
- EUTROMED, Proyecto LIFE. Informe Laymen en su página web en <http://eutromed.org/>.
- FANGMEIER, D.D., ELLIOT W.J., WORKMAN S.R, HUFFMAN R.L., & SCHWAB G.O. (2006). Soil and water conservation engineering, 5th ed. Thomson Delmar Learning, Clifton Park, NY. 502 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia) (2009). Erosión de suelos en América Latina. Roma, Italia.
- FARFÁN, R. (2002). Determinación del índice de erosividad pluvial (R) de la ecuación universal de pérdidas de suelos, para dos estaciones pluviográficas de la VII Región del Maule. Tesis Ing. Forestal. Talca, Chile. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales. 123 p.
- FAVIS - MORTOLOCK, D. (2007). Soil Erosion Site: Erosion Processes. (en línea). Irlanda del Norte.
- GARCÍA, J. (2006). La erosión: Aspectos conceptuales y modelos. En Hidrología de superficie y conservación de suelos. Material de clase 2007. (en línea). España.
- GARCIA – CHEVESICH, P. (2008). Procesos y Control de la Erosión. Outskirts Press Inc. Arizona, Estados Unidos. 292 pp.
- GARCÍA R., & PÉREZ G. (2005). Degradación de suelos en Castilla La Mancha: Estudio de áreas piloto mediante teledetección. Observat. Medioamb. 8: 55-71.

- GÓMEZ J. (2003). Instituto de Agricultura Sostenible-CSIC. Córdoba (España). Procesos erosivos en olivar en Andalucía a diferentes escalas: entendimiento, magnitud, implicaciones e intentos de control.
- GONZÁLEZ, L., SILVA, A., & GONZÁLEZ, A. (2000). Vulnerabilidad de las aguas subterráneas de la cuenca del Río Claro, VIII Región del BíoBío, Chile. Joint World Congress on Groundwater (1), 1-11.
- HONORATO, R., BARRALES, L., PEÑA, I. & BARRERA, F (2001). Evaluación del modelo USLE en la estimación de la erosión en seis localidades entre la IV y IX región de Chile. Revista Ciencias de la Agricultura, 2001, vol. 28, N° 1, p. 7-14
- INSPIA (2015) European Index for Sustainable Productive Agriculture. 2015. Página web: <http://www.inspia-europe.eu/> Fecha de último 24 de septiembre de 2015 Inventario Nacional de Erosión de Suelos 2002-2012.
- IPCC (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis: Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 pp.
- JAQUE, E. (2008). Geomorfología de la cuenca del río Andalién, Chile. Revista Geográfica (143), 97-116.
- JIANG Y & PIZA H (2015). A Review of Applicability and Effectiveness of Low Impact Development/Green Infrastructure Practices in Arid/Semi-Arid United States.
- KAI LIU, HU DING, GUOAN TANG, JIAMING NA, XIAOLI HUANG, ZHENG GUANG XUE, XIN YANG & FAYUAN LI (2016). Detection of Catchment-Scale Gully-Affected Areas Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) on the Chinese Loess Plateau. International Journal of Geo-Information.
- KRENZ J & KHUN N (2018). Assessing Badland Sediment Sources using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Chapter 8. Badland Dynamics In the Context of Global Change.
- MANNAERTS, C. (1999): Factores de erosión.
- MARDONES M. & VIDAL C. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. Revista EURE Vol. XXVII, N° 81 pp. 97-122. Santiago de Chile.

- MARDONES M. & JAQUE E. (1991) Geomorfología del valle del río Laja. Extensos de ponencias y Seminarios Congreso Ciencias de la Tierra, Santiago IGM. 115 – 121.
- MARTÍNEZ, P (2017). Análisis espacio-temporal de la erosión en cárcavas en el olivar. Aplicación de técnicas microgeodésicas. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Experimentales Universidad de Jaén. España.
- MINTEGUI, J & LÓPEZ, F. (1990). La ordenación agrohidrológica en la planificación. Bilbao, España. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 309 p.
- MITSIKOTAS E (2017). Monitorización y Optimización de Tierras con Drones y Fotogrametría Aérea para Aplicaciones de Precisión en Agricultura. Tesis para el Título de Ingeniero en Geomática y Topografía. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia España (p.87).
- MORENO, M., & GALLART, F. (2018). The origins of Badlands. En E. Nadal, J. Martínez, & N. Kuhn, Badlands dynamics in the context of global change (págs. 27-59). Ámsterdam: Oxford.
- MORGAN, R. (1997). Erosión y conservación del suelo. (en línea). Madrid, España.
- MORGAN, R., (2005). Soil erosion and conservation. Third Edition. Blackwell Publ., Cornwell. (en línea).
- MUÑOZ, E., & REBOLLEDO, J. (2017). Cambios en el espacio productivo del secano interior. El caso de la comuna de Yumbel 1976-2016. Espacios (39), 72-90.
- MUÑOZ-PEDREROS A (2000) Conservación de Recursos Naturales. Guía de Cátedra. Universidad Católica de Temuco. Temuco, Chile.
- NEARING, M., YIN, S., BORRELLI, P & POLYAKOV V (2017). Rainfall erosivity: An historical review. Catena 157 (2017) 357–362
- OSTERKAMP, W.R (2008). Annotated Definitions of Selected Geomorphic Terms and Related Terms of Hydrology, Sedimentology, Soil Science and Ecology, USGS Open file Report 2008-1217, Reston, Virginia.
- OYARZUN C (1993) Estimación de los Procesos de Erosión Hídrica en un Ambiente Montañoso de la Cuenca del Río Bío-Bío, Región del Bío-Bío, Chile. Tesis Doctorado Cs. Ambientales. Universidad de Concepción. 121 pp.
- PEÑA-CORTES F (1999) Bases para la Planificación Territorial del Curso Inferior del Río Itata. Análisis Integrado de los Sistemas Geográficos. Tesis Doctorado Cs. Ambientales. Universidad de Concepción. Chile. 227 pp.

- PEÑA-CORTÉS F, GUTIERREZ P, REBOLLEDO G, ESCALONA M, HAUENSTEIN E, BERTRÁN C, SCHLATTER R & TAPIA J (2006) Determinación del Nivel de Antropización de Humedales como Criterio para la Planificación Ecológica de la Cuenca del Lago Budi, IX Región de La Araucanía, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande* 36: 75-91.
- PEÑA-CORTÉS F, ESCALONA-ULLOA M, REBOLLEDO G, PINCHEIRA- ULBRICH J & TORRES-ALVAREZ O (2009) Efecto del Cambio en el Uso del Suelo en la Economía Local: Una Perspectiva Histórica en el Borde Costero de La Araucanía, Sur de Chile. Programa CYTED. 184-197
- PIDWIRNY, M. 2006. Erosion and deposition. In *Fundamentals of physical geography*. (en línea). Kelowna, Canada.
- PIERRE, J. (2010). *Erosion and sedimentation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- PIMENTEL, D., HARVEY, C., RESOSUDARMO, P., SINCLAIR, K., KURZ, D., MCNAIR, M., y otros. (1995). Costos ambientales y económicos de la erosión del suelo y beneficios de conservación. *Science*, 265(5201), 1117-1123.
- PIZARRO, R., MORALES, C, VEGA, L., OLIVARES, C., VALDÉS, R & BALOCCHI F (2009). Propuesta de un modelo de estimación de Erosión Hídrica para la Región de Coquimbo, Chile. PHI-VII/ Documento Técnico N°18. UNESCO y Universidad de Talca.
- PIZARRO, R.; SANGUESA, C.; BRAVO, C.; FARÍAS, C. 2003a. Manual de conservación de aguas y suelos. Instructivo No 1 Zanjias de Infiltración. (en línea). Talca, Chile.
- PLADECO (2014-2017). Plan Estratégico de Desarrollo Comunal. Orientaciones Globales, Presupuesto Municipal y Programa Anual 2014-2017. Ilustre Municipalidad de Yumbel, Región del Biobío.
- PLADECO (2015). Plan Regulador Comunal, Comuna de Yumbel. (2015). Ilustre Municipalidad de Yumbel, Región del Biobío.
- RANGHU WANG, SHUWEN ZHANG, LUOMAN PU, JIUCHUN YANG, CHAOBIN YANG, JING CHEN, CONG GUAN, QING WANG, DAN CHEN, BOLIN FU & XUEJIA SANG (2016). Gully Erosion Mapping and Monitoring at Multiple Scales Based on Multi-Source Remote Sensing Data of the Sancha River Catchment, Northeast China. *International Journal of Geo-Information*.

- RENARD, K.G., FOSTER, G.A., WEESIES, D.K., MCCOOL & YODER D.C. (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A guide to Conservation Planning with The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).
- RIVERA, P, RIVERA J, ANDRADE E, DE LA GARZA F, CASTRO B & BELMONTE F (2014). Medición de la erosión en cárcavas por medio de imágenes de satélite. *Gully erosion measurement with satellite images*. Terra Latinoam vol.32 N°1. Disponible en [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792014000100013](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792014000100013)
- RÖDER J, VILLAVICENCIO R & ZARAZÚA VILLASEÑOR, P (2006). Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida De Suelo "Usle" en SIG para Estimar Riesgo Potencial de Erosión en el Área Protegida "Sierra De Quila". 2006 – Avances en la Investigación Científica en el CUCBA. Universidad de Guadalajara.
- ROSSI A, RHODY H, SALVAGGIO C & WALVOORD D (2012). Abstracted Workflow Framework with a Structure from Motion Application. En *Image Processing Workshop.(WNYIPW)*. En New York, Estados Unidos. El 09 de noviembre de 2012 (p.4)
- SARRICOLEA P, MESEGUER-RUIZ O, MARTIN-VIDE J & OUTEIRO L (2018). Trends in the frequency of synoptic types in central-southern Chile in the period 1961- 2012 using the Jenkinson and Collison synoptic classification. *Theoretical and Applied Climatology*. 134, 193-204 (2018).
- SEPÚLVEDA, A., SAAVEDRA, P., & ESSE, C. (2019). Análisis de cambio de cobertura y uso de suelo en una subcuenca preandina chilena. Herramienta para la sustentabilidad productiva de un territorio. *Revista geográfica del Norte Grande* (72), 9-25.
- SUDAS (STATEWIDE URBAN DESIGN AND SPECIFICATIONS, USA). (2006). The erosion and sedimentation process. In Iowa Statewide Urban Design Standards Manual. 2007. (en línea). Iowa, Estados Unidos.
- TAGUAS, E., GIRÁLDEZ, J, AYUSO, J, PÉREZ, R, CASTILLO, C, GÓMEZ, J (2012a). Preliminary assessment and cost analysis of incentives for gully control in agricultural areas of Andalusia (Southern Spain). *Geophysical Research Abstracts* Vol. 13: EGU20114693
- TARBUCK E. & LUTGENS, F (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología Física*. 8va Edición. ISBN edición española: 84-205-4400-0. 712 pp.

- TROEH, F.R., HOBBS, J.A. & DONAHUE, R.L. (1991) "Chapter Six: Predicting Soil Loss" Soil and Water Conservation, 2nd ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA. En Martínez (2017), Análisis espacio-temporal de la erosión en cárcavas en el olivar. Aplicación de técnicas microgeodésicas. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Experimentales Universidad de Jaén. España.
- USDA (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, USA). (2002). Water erosion. In National agronomy manual. (en línea).
- YOSHIKAWA S & NEMOTO K (2010) Seasonal variations of sediment transport to a canuon and coastal erosion along the Shimizu coast, Suruga Bay, Japan. Marien Geology 271: 165-176.
- WALLING, D. (2013). The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems. Journal of Soils Sediments 13:1658–1675
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. Trans. AGU 39:285-291.
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses – Aguide to Conservation Planning, Agriculture Handbook No. 537, USDA- Agricultural Research Service, Washington, DC

