

**Plantaciones forestales para el control de la erosión. Una reconstrucción a través
de la evidencia histórica, paleolimnológica y palinológica.**

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniero Ambiental

Carlos Ignacio Bahamóndez Urrutia

CONCEPCION (Chile), Año 2025

“PLANTACIONES FORESTALES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN. UNA RECONSTRUCCIÓN A TRAVÉS DE LA EVIDENCIA HISTÓRICA, PALEOLIMNOLÓGICA Y PALINOLÓGICA”

Profesor Guía: Dr. Alberto Araneda Castillo



Profesor Guía: Fernando Torrejon Godoy



Profesor Comisión: Dr. Pedro Arriagada Sanhueza



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MAXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- | | |
|----------------------------------|---------------------------|
| ✓ Aprobado por Unanimidad : | (En Escala de 4,0 a 4,9) |
| ✓ Aprobado con Distinción | (En Escala de 5,0 a 5,6) |
| ✓ Aprobado con Distinción Máxima | (En Escala de 5,7 a 7,0) |

Concepción, abril 2025

Índice

1.	Introducción	5
1.1	Suelos	10
1.2	Erosión	12
1.3	Problemática	Error! Marcador no definido.
1.4	Chile	14
1.5	Registros sedimentarios	20
1.6	Polen	Error! Marcador no definido.
2.	Metodología	24
2.1	Área de estudio	24
2.2	Análisis físicos y geocronológicos	25
2.2.1	Extracción de núcleos sedimentarios:	25
2.2.2	Medición de Susceptibilidad Magnética:	26
2.2.3	Preparación de muestras para análisis de laboratorio:	27
2.3	Análisis de laboratorio:	30
2.4	Cronología Isotópica	32
2.4.1	Fundamento metodológico de la geocronología (Pb^{210})	32
2.5	Registro de datos:	37
2.6	Análisis de polen	38
2.6.1	Extracción de sedimento y secado:	38

2.6.2	Molienda y preparación de tubos de ensayo:	38
2.6.3	Ataque con ácido fluorhídrico (HF):	38
2.6.4	Tratamiento con solución acetolítica y montaje para análisis microscópico:	38
2.6.5	Conteo de Polen	39
2.7	Análisis histórico	39
3	Resultados	40
3.1	Análisis Histórico	40
3.1.1	Cambio del paisaje en la zona de estudio.	40
3.2	Análisis sedimentológicos	52
3.2.1	Cronología Embalse Huelehueico.	52
3.2.2	Susceptibilidad Magnética ($SM \times 10^{-8}$)	53
3.2.3	Porcentaje de Pérdida por Ignición a 950 °C (% LOI 950/Materia Orgánica)	54
3.2.4	Porcentaje de Pérdida por Ignición a 550 °C (% LOI 550/Materia Inorgánica)	54
3.2.5	Media logarítmica en phi obtenida mediante análisis granulométricos.	55
3.2.6	Selección en phi obtenida mediante análisis granulométricos.	56
3.2.7	Asimetría en phi obtenida mediante análisis granulométricos.	56
3.3	Análisis Polínicos	1
3.3.1	Concentración de Polen de Pino	1
3.4	Perfil de tasa de sedimentación	3
3.4.1	Tasa de sedimentación $g/cm^2/año$	3
4	Discusión	5
5	Conclusión	8

1. Introducción

1.1 Problemática

La erosión del suelo es una de las principales problemáticas a nivel mundial, ya que los ecosistemas degradados afectan negativamente los factores económicos y sociales,

mientras que el recurso suelo presenta efectos variados y muchos de ellos se asocian a la pérdida de productividad (den Biggelaar et al., 2004). Por definición, la productividad del suelo relaciona la capacidad del suelo con la producción de un cultivo bajo un sistema de manejo específico (FAO, 1984), al perder la capa superficial por medio de la erosión, se pierden la mayoría de los nutrientes y el agua que necesitan las plantas, lo que disminuye la productividad y afecta directamente a los agricultores que pierden un vital recurso para el cultivo de alimentos.

La aplicación de prácticas agrícolas inadecuadas provoca un acelerado agotamiento del recurso suelo (Clemens et al., 2010). Estos problemas relacionados con la erosión del suelo se volverán más graves por efectos del calentamiento global (IPCC 2007)

A nivel mundial, según el instituto de Vigilancia Mundial (Worldwatch Institute) se estima que cada año los continentes pierden 24.000 millones de toneladas de capa cultivable (Figura 1). Por otro lado, también se estima que el 75% de los suelos cultivados del mundo tienen algún tipo de degradación o se han visto afectados por este fenómeno. Hoy en día los suelos que presentan mayores niveles de erosión son aquellos de zonas agrícolas o forestales y se sabe que desde 1950 se convirtieron más tierras de pastizales y bosques en áreas agrícolas que durante los siglos XVIII y XIX juntos (Figura 7).

Con respecto a Chile es importante mencionar el rol que interpretaron las plantaciones forestales para el control de la erosión, ya que estas en un principio se plantaron con el fin de mejorar los suelos. Las primeras forestaciones del siglo XX respondían tanto a un objetivo económico como conservacionista, ya que también se fomentaron para controlar la erosión del suelo que surgió de la tala y quema de bosque nativo para la agricultura durante los siglos XVII y XVIII (Morales 1989), provocando más de 200 años de deforestación en el centro-sur de Chile (Armesto et al. 2010). Hacia 1950, el Estado le da un impulso a la forestación especialmente con plantaciones de *Pinus radiata* con el objetivo

de recuperar y estabilizar suelos severamente erosionados de la cordillera de la Costa. En 1973 solo existían 330.000 ha plantadas con plantaciones exóticas de crecimiento rápido, mientras que hacia el 2016 se habían incrementado hasta 2.400.000 ha, mayormente cultivadas bajo manejos industriales, tales como, aplicación de agroquímicos, altas densidades de plantación y talas rasas extensivas, destinadas principalmente para producir celulosa (Manuschovich 2020).

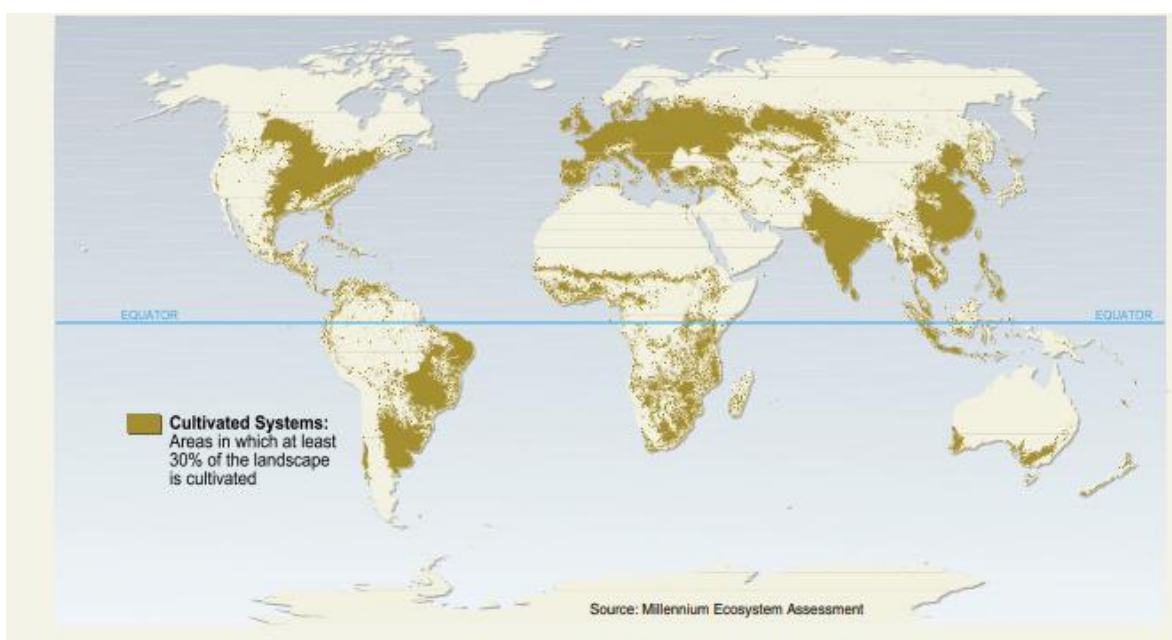


Figura N°1: Tierras cultivadas en el mundo. Fuente: Millenium Ecosystem Assessment (2005).

Según la evaluación mundial realizada en 1991 sobre la degradación antrópica de los suelos (GLASOD), se constató que el 15% de la superficie total de las tierras en todo el mundo habían sufrido daños, presentando un 13% casos ligeros y moderados y un 2% casos graves y muy graves, debido principalmente a la erosión, la disminución de nutrientes, salinización y compactación física. La mayoría de estos efectos pueden

traducirse en una reducción del rendimiento. Aunque existen suelos gravemente degradados en el mundo, se estima que los efectos de un suelo degradado afectan mayoritariamente a países que dependen de la agricultura para sus ingresos (Oldeman et al., 1991.)

Ahora respecto a datos más recientes, según el último informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO, 2012), entre el 10 y el 20% de los 1,5 millones de hectáreas de las tierras de cultivo en el mundo, habrían sufrido algún nivel de degradación, mientras que, mediante la utilización de imágenes satelitales de los años 1981 y 2003, los investigadores de la FAO estimaron que el 24% de toda la superficie terrestre está agotada.

Se estima que del área total mundial afectada por la degradación del suelo inducida por el hombre, la degradación más importante es la erosión hídrica y se encuentra en 1.093 millones de ha (56%), le sigue en extensión la erosión eólica con una superficie de 548 millones de ha (28%) del área afectada (Ruiz-Sinoga et al., 2013).

Según se observa en la Figura 2, las tasas más elevadas de erosión (hídrica y eólica) se producen en gran parte de China, África central y sur, América del sur, y el oeste de Norteamérica. Encontrándonos con Chile como una de las zonas con tasas de erosión más elevadas.

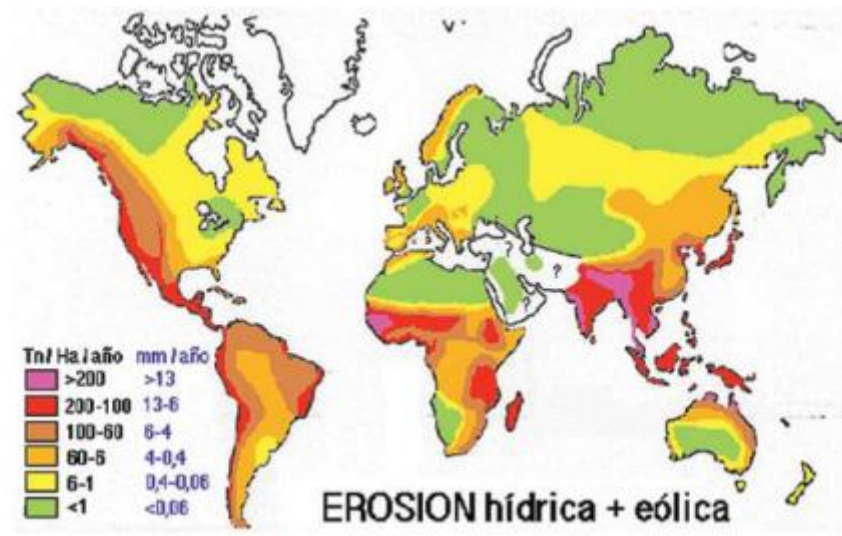


Figura N°2: Erosión hídrica y eólica a nivel mundial.

1.2 Pregunta de investigación.

¿Las plantaciones forestales establecidas en las cuencas lacustres, han disminuido la sedimentación o por el contrario la han aumentado a lo largo de 60 años?

1.3 Objetivo General

Evaluar los efectos de las plantaciones forestales (históricas) en las tasas de sedimentación en una cuenca lacustre del sur de Chile.

1.4 Objetivos Específicos

- Estimar los montos históricos de sedimentación mediante geocronología isotópica
- Identificar mediante un análisis palinológico, la relación entre la presencia de plantaciones forestales (Pino) y las tasas de sedimentación.
- Reconstruir los patrones históricos de uso del suelo mediante la revisión de fuentes documentales.
- Relacionar la información histórico documental con la reconstrucción de los montos de sedimentación y las concentraciones de polen de pino

2. Antecedentes

2.1 Suelos

El suelo es la capa superior de la tierra, este se forma por la destrucción de la roca y la acumulación de materiales distintos a lo largo de los siglos.



Figura N°3: Formación del suelo. Fuente: Manual Manejo y conservación de suelos (Quisurucu, Gary 2022).

Está compuesto de sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos (agua y sustancias disueltas), gases (principalmente oxígeno y dióxido de carbono) y contiene organismos vivos (Flores Cota, 2009). Este presenta un perfil definido, que se define como la descripción de sus horizontes, desde los superiores hasta los más profundos que se diferencian por su composición mineral, cantidad de materia orgánica, grado de descomposición de la roca entre otras.

El suelo es objeto de diferentes presiones y agentes de cambio que lo moldean. Las principales afectaciones están dadas por las prácticas de manejo y remoción de la vegetación natural, su exposición a sustancias contaminantes y el cambio de uso de suelo (Gonzales Irineo, R 2013), esto se conoce como la degradación del suelo, la cual lleva a “la

degradación biológica perdida de la “vida” del suelo y son los responsables de la disminución de su capacidad productiva.” (Carrasco et al., 2010).

Existen distintos tipos de degradaciones del suelo como la del medio químico, el medio biológico, y el medio físico, siendo esta última la que explicaremos con más profundidad ya que es pertinente para este estudio.

La degradación del medio físico se refiere al deterioro de las propiedades físicas, principalmente la estructura, como consecuencia del mal manejo del suelo con la labranza. Por efecto de la compactación se produce aumento de la densidad aparente, disminución de la porosidad. Un exceso en labores aumenta la pérdida de materia orgánica lo que conlleva la pérdida de estabilidad estructural, que a su vez se traduce en erosión, y finalmente desertificación (Carrasco et al., 2010).

Según Perez (1992) esta se produce en tres etapas que van aumentando según el daño producido hacia el suelo.

Etapas 1. Las características originales del suelo son destruidas gradualmente. La degradación es poco perceptible debido a la poca intensidad de los procesos y al mantenimiento de la productividad.

Etapas 2. Se producen pérdidas acentuadas de la materia orgánica, con fuerte daño de la estructura (colapso estructural). Se produce compactación subsuperficial que impide la infiltración del agua y la penetración de raíces. De esta forma, la erosión se acentúa.

Etapas 3. El suelo está intensamente dañado, con gran colapso del espacio poroso. La erosión es acelerada. La productividad cae a niveles mínimos. El tiempo para llegar a esa tercera etapa de degradación, depende de la intensidad de uso de prácticas inadecuadas de labranza y manejo, de la pendiente de las tierras, de la textura del suelo y de la resistencia del suelo a la erosión hídrica.

2.2 Erosión

Se define la erosión del suelo como un proceso geomorfológico dinámico y gradual que, en conjunto a otros subprocesos degradativos permanentes en el relieve (meteorización y remoción en masa), altera la condición de equilibrio estático en la superficie terrestre (CIREN, 2010)

En términos generales, la degradación provoca alteraciones en el nivel de fertilidad del suelo y consecuentemente en su capacidad de sostener una agricultura productiva (FAO, 1996).

Por otra parte, la erosión de un determinado tipo de suelo se puede considerar como el proceso de pérdida de capas o movimiento de partículas de éste, generado por agentes externos naturales (viento, agua, hielo) además de humana (FAO, 2009), es fundamental mencionar que la erosión la ocasionan distintos factores, los cuales generan una energía capaz de erosionar el suelo, los cuales pueden actuar en conjunto o solos (Tabla). En torno a esto, se pueden distinguir en primer lugar cuatro agentes con capacidades erosivas, que son el agua (erosión hídrica), el viento (erosión eólica), el hielo (erosión glacial) y la gravedad.

Tabla N° 1: Agente, tipos de erosión y procesos erosivo (Fuente: García-Chevesich, 2008).

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

Dentro de los agentes que más influyen en la depresión intermedia de Chile se encuentra la erosión hídrica, que viene en forma de precipitación, la que según su intensidad constituye un agente preponderante en el proceso erosivo, y que influye aún más que la duración y frecuencia de estas, lo que se explica con que al aumentar la intensidad se incrementa su energía cinética y por ende la dispersión del suelo (Oyarzún, 1993). Las consecuencias de la erosión hídrica están estrechamente relacionadas con las vías que sigue el agua por la superficie del suelo y su paso a través de la cobertura vegetal (Esgurrimiento superficial) (Pizarro et al., 2009). Este proceso comienza con la llamada disgregación hídrica, las partículas que son disgregadas por algunos de estos subprocesos pueden ser removidas de su lugar de origen por las gotas que salpican, o bien pueden ser arrastradas o incorporadas al flujo, como partículas en suspensión, debido a las fuerzas de arrastre hidrodinámico (Ayala et al., 1989) para finalmente sedimentar en algún punto en específico, sedimentar es el proceso por el que se depositan o precipitan los materiales transportados.

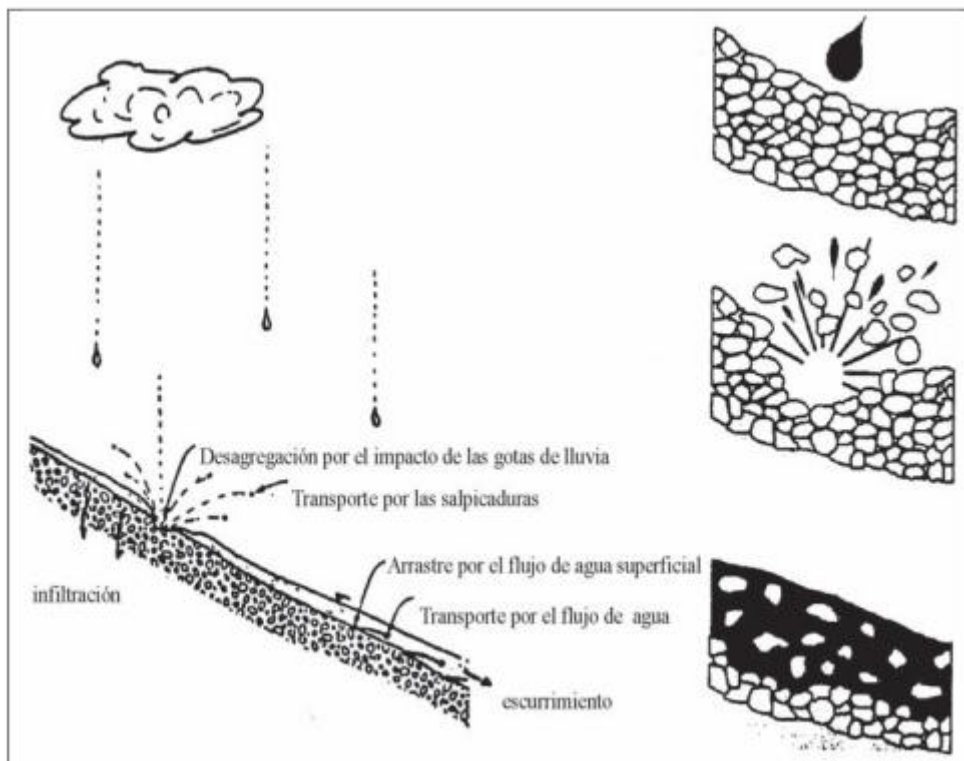


Figura N°4: Procesos de Erosión Hídrica (Fuente; Rivera et al., 2006).

2.3 Chile

Respecto a Chile la distribución de las tierras erosionadas a lo largo del país no es regular, siendo posible encontrar áreas escasamente erosionadas, así como sectores en los cuales las pérdidas físicas del suelo, como de su capacidad productiva son prácticamente irrecuperables (Espinosa et al., 1992). Aunque se reconoce que gracias a estudios históricos y geomorfológicos la erosión es un proceso natural, lo que no es natural es su distribución e intensidad a lo largo del tiempo y el espacio, lo cual se debe al resultado de interacciones físicas y humanas (Morgan, 1997).

De esta manera se ve transgredido el equilibrio de los procesos erosivos, generando una erosión más bien acelerada, que se atribuye principalmente a la acción humana, que lleva

en algunos casos a la desaparición del suelo. Este tipo de erosión recibe el nombre de erosión antrópica o acelerada, y se debe principalmente a la tala de bosques, la agricultura intensiva con técnicas de cultivo inadecuadas, el abandono de las tierras, las cuales están relacionadas con el cambio de la cobertura de suelo (Bienes-Allas, 2006)

Como ocurre en los terrenos de la cordillera de la costa, los que presentan grandes pendientes y se encuentran sumamente degradados, ya que la influencia del ser humano se remonta desde el siglo 17 en adelante, primero con la tala de bosque nativo, luego con el sobrepastoreo y una utilización excesiva de terrenos de secano en el cultivo de trigo. Los terrenos de la Cordillera de la Costa en la zona de Concepción se convirtieron en grandes productores de trigo de exportación a fines del siglo XVII y principios del siglo XVIII, en un principio hacia el mercado cerealero de Perú, para después exportarlo directamente a California y Australia ya que vivían un gran auge económico gracias a sus yacimientos de oro. (Endlicher, 1988). El gran mercado del trigo se mantuvo hasta los años setenta del siglo XIX (Inostroza, 2015). Los resultados fueron el desmonte progresivo y la densificación del poblamiento. El cambio de la agricultura a la ganadería aceleró la degradación de los terrenos abiertos. Aún en 1930 la existencia de ganado bovino y ovino era, respectivamente, 4,5 y 10 veces mayor que en el presente. El sobrepastoreo de los terrenos abiertos, el ramoneo de los matorrales y el daño por pisoteo continúan inestabilizando el sistema ecológico (Endlicher, 1988).

Los primeros en mostrar la magnitud de la erosión en Chile fueron Elgueta y Jirkal en 1943, estimando que entre Valparaíso y Cautín se encontraban alrededor de cuatro millones de hectáreas afectas por la erosión, luego en 1951. Rodríguez y Díaz determinaron las primeras categorías de erosión en cuanto a su severidad para las provincias del Maule, Bio-Bío y Malleco. En 1965 el Instituto de Investigación de Recursos Naturales de Chile (IREN), aparte de reconocer la acción erosiva, realizó un estudio en el que se establecieron los

distintos niveles de gravedad en que se encontraban las provincias de Santiago, O'Higgins, Colchagua, Curicó, Talca, Maule, Ñuble, Bio-Bío, Concepción, Arauco, Malleco y Valparaíso, como se observa en la siguiente tabla.

Cuadro 1. Superficie afectada por erosión en Chile en distintos grados (hectáreas), 1957.

CLASES DE EROSIÓN	MILES DE HA	% SOBRE SUPERFICIE AGRÍCOLA	% SOBRE SUPERFICIE TERRITORIAL
Erosión ligera o sin erosión	5.360	17,4	7,2
Erosión ligera dominante	9.425	30,5	12,7
Erosión moderada	825	2,7	1,1
Erosión moderada o severa	3.260	10,5	4,4
TOTAL DEL PAÍS	18.870	60,1	25,4

Figura N°5: Superficie afectada por la erosión en Chile, 1957 (Fuente: CIREN 2010).

Es así como queda reflejado que el estado para la década del 1950 ya mostraba una preocupación con respecto al aumento de la erosión a lo largo del País, se promovieron investigaciones y la generación de datos, tanto estadísticos como cartográficos que permitieran cuantificar y visualizar la magnitud del problema, para así mediante estos conocimientos realizar políticas públicas que permitan aminorar la erosión y recuperar así la capacidad productiva de los suelos.

Dentro de las iniciativas que surgen para poder mitigar el avance de la erosión, el fomento de las plantaciones forestales fue una de ellas como se evidencia en las dunas de Chanco, “entonces las dunas comenzaban a sepultar al otrora pujante Departamento de Chanco. Años después, en 1914, los trabajos iniciados hacía 16 años habían logrado reconquistar con plantaciones forestales y pequeños potreros de pastoreo, más de 300 hectáreas de superficie. En ellas se habían cultivado con éxito unos dos millones de árboles, algunos de ellos con 15, 20, 25 y más metros de altura.” (Camus et al., 2014)., También se plantea que, en lugares con altas pendientes, donde se hace casi imposible poder realizar algún tipo de agricultura y, por ende, el suelo queda desprotegido ya que posee poca cobertura vegetal,

se presenta una gran oportunidad para las plantaciones forestales que contribuyan a mitigar la erosión” (Perret et al., 2000). Materializando la expansión de las plantaciones forestales, “el 17 de octubre de 1925 se despachó el Decreto Ley N°656, que planteó las ideas que inspiraban un nuevo cuerpo legal en materia forestal. En este se recalcaba la importancia del bosque en la economía general de los pueblos, especialmente en la protección, ampliación y mejoramiento de los suelos, la regulación del caudal de los ríos, la conservación de los recursos hídricos, la regularización del clima y el abastecimiento de madera. Por ello, los terrenos declarados forestales quedarían sujetos a los planes de vigilancia, cultivo, repoblación y explotación que establecerían los reglamentos especiales que se dictaran. La declaración de los terrenos que debían someterse a un régimen forestal se haría por períodos de 10 años, durante los cuales quedarían exentos del pago de toda contribución fiscal y municipal, y disfrutarían de otras franquicias como un incentivo económico a aquellos particulares que plantaran bosques y se sometieran a los reglamentos respectivos” (Camus 2006).

En 1965 el estado crea el “Plan Nacional de Reforestación” que tenía por objetivo plantar cinco millones de hectáreas para el año 2000 en llamados suelos con aptitud forestal, que se referían principalmente a los suelos que estuvieran afectados por la erosión. Con posterioridad a 1973 se impulsó nuevamente este sector con una estrategia que tenía por objetivo el desarrollo económico del país, este nuevo proyecto fue conocido como Decreto Ley N°701 de 1974, cuyos objetivos estaban orientados hacia la protección, incremento, manejo racional y fomento de las actividades forestales en Chile (CONAF-INFOR 2004). Este se focaliza en la regulación del manejo y uso de los bosques, otorgando incentivos para la forestación y recuperación de suelos agrícolas y degradados. El fomento mediante el DL 701 desencadenó que durante el periodo 1980-1997 se forestaran 822.428 hectáreas, concentrándose un 88% entre las regiones del Maule y Los Lagos (AGRARIA 2005).

Desde entonces adquieren mucha importancia las plantaciones forestales como forma de detener la erosión. “No obstante, autores como Gayoso e Iroume (1995), Araya (2003) y Agrupación de Ingenieros Forestales por el bosque nativo (2012) acusan lo contrario, señalando que la erosión, se acentúa con la homogeneidad del paisaje a partir de la introducción de especies forestales exóticas con fines industriales. Además, Otero (1990), Poisson (1990) y (Álvarez) 1989 en Ibarra, Mancilla y Peralta (1996) y García-Chevesich (2015) señalan que la preparación del sitio para la explotación y las actividades forestales como la tala rasa, raleos y construcción de caminos, entre otras, representan una enorme alteración en el ciclo hidrológico, lo que se traduce en una disminución en la intercepción de copa y capacidad de infiltración de los suelos, debido al uso de maquinaria pesada. Dichos disturbios generan gran cantidad de erosión y sedimentación.” (Castro, P 2018)

Para ahondar aún más en esta contradicción, presentamos los siguientes estudios con respecto a la utilización del Pino Insigne para detener la erosión.

Por una parte tenemos el estudio de Alberto Alaniz de la Universidad Austral de Chile, titulado *“Linking sedimentological and spatial analysis to assess the impact of the forestry industry on soil loss: The case of Lanalhue Basin, Chile”* (Alaniz, A et al 2021), donde se analizó la dinámica histórica y reciente de la pérdida de suelo en la cuenca lacustre costera del lago Lanalhue en Chile central, y se encontró un aumento significativo en las tasas de sedimentación y en la concentración de materia orgánica y arena después de 1950 (Figura 6). Llegando a los resultados de que la erosión del suelo ha sido alta y constante en los últimos 30 años, especialmente en áreas deforestadas y plantaciones forestales exóticas. Concluyendo que la silvicultura industrial es la actividad principal que afecta la dinámica de la erosión en la cuenca.

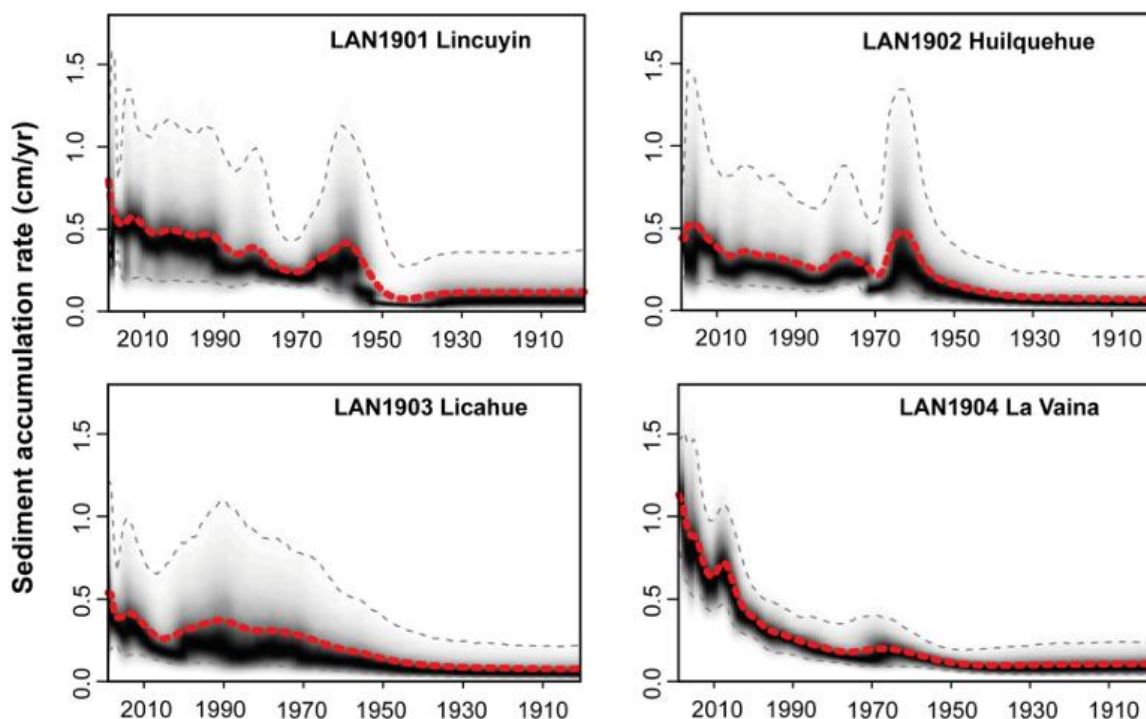


Figura N°6: Tasa de sedimentación en cuatro Cores del lago Lanalhue (1900-2019). Fuente:

Extraído de Alaniz et al. (2021).

Lo cual es contradictorio a lo presentado Roberto Pizarro, académico de la universidad de Talca, en su artículo titulado “*Establishment of Monterrey Pine (*Pinus radiata*) Plantations and Their Effects on Seasonal Sediment Yield in Central Chile*” (Pizarro, et al., 2022), en el cual se estudiaron dos cuencas con diferentes regímenes hidrológicos y coberturas vegetales: una con plantaciones forestales y régimen pluvial (Purapel) y otra con bosque nativo y régimen pluvio-nival (Ñuble, Figura 7). Sus resultados obtuvieron que ambas cuencas mostraron mayores cantidades de sedimentos durante los meses de invierno, pero se observó una disminución continua en la liberación anual de sedimentos en la cuenca de Purapel, posiblemente atribuible a la forestación de la zona. Finalmente concluyen que las plantaciones forestales son eficientes en la retención de sedimentos, incluso en

comparación con el bosque nativo. Sin embargo, se reconoce que se necesitan más estudios para respaldar esta teoría, considerando las diferencias en suelo, topografía, entre otros factores.

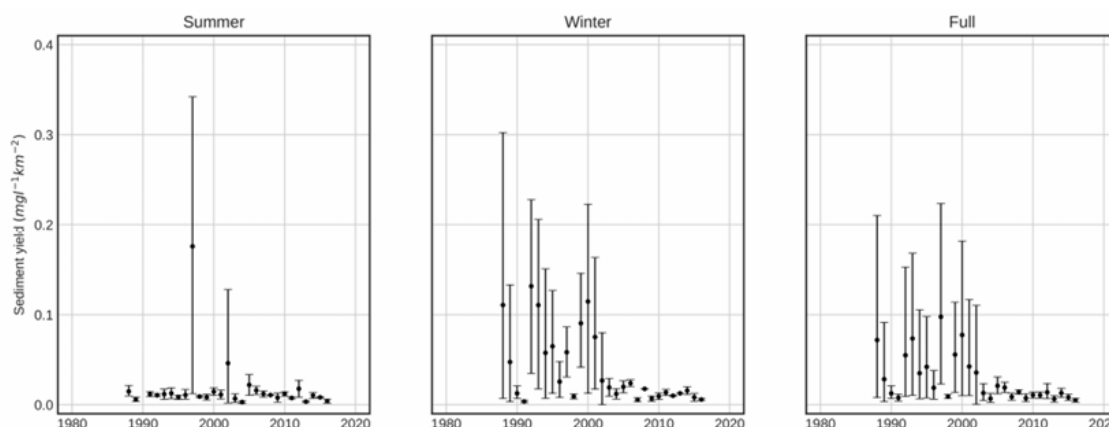


Figura N°7: Tasa de sedimentación en cuenca de Purapel. Fuente: (Extraído de Pizarro et al., 2022).

Respecto a la actualidad del país, vemos que el problema de la erosión es de largo recorrido encontrándonos hoy en día con los siguientes escenarios para el país con un 45,7% de la superficie del país afectada por la erosión (Centro de Análisis de Políticas Públicas, 2018).

2.4 Registros sedimentarios

La Paleolimnología es una rama de la ciencia que se dedica al estudio de los sedimentos presentes en los lagos con el fin de reconstruir la historia ambiental de estos cuerpos de agua. A través de la extracción de muestras de sedimentos del fondo de los lagos, los científicos obtienen registros estratigráficos que contienen información valiosa sobre los cambios que han ocurrido a lo largo del tiempo. Rescatando esta dinámica temporal de los problemas ambientales, durante la última década se ha valorado el papel de “registrador histórico” que tienen los sedimentos (Flower et al., 1989)

Los sedimentos que lentamente van decantando, registran entre sus capas información valiosa sobre los cambios que ocurrieron a lo largo del tiempo. Lo anterior, se debe a los procesos de deposición y acumulación de material formado tanto en el interior del cuerpo de agua, como aquel proveniente de la cuenca (incluyendo material terrestre y atmosférico), siendo conservada en el sedimento en forma de secuencia cronológica como se observa en la Figura 8.

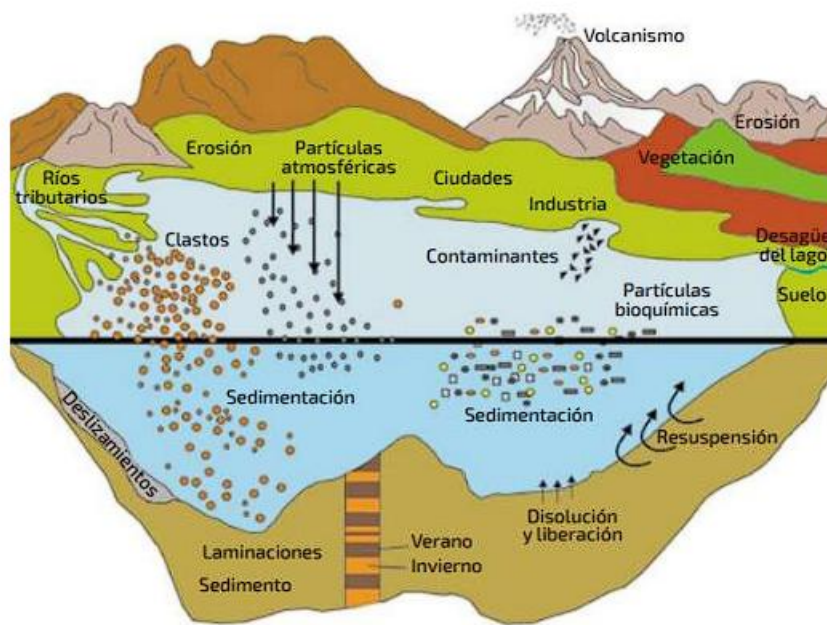


Figura N°8: Forzantes naturales y antrópicas que influyen en un lago. Fuente: (Extraído y modificado de Wohlfarth & Bjork (2001).

Dado esto, es que las consecuencias de las actividades humanas sobre las cuencas son buscadas en la naturaleza de los sedimentos, estos pueden acumular en el fondo diferentes compuestos orgánicos, inorgánicos y biológicos, que permiten la elaboración de un perfil para estudiar las concentraciones en el pasado y en la actualidad (Frey, 1988).

En los componentes inorgánicos y orgánicos encontramos los proxies fisicoquímicos que permiten inferir señales de cambios naturales y antrópicos ocurridos en estos ecosistemas. Estos cambios pueden estar referidos a variaciones en la productividad del lago, sus condiciones tróficas, cambios en la salinidad y fluctuaciones en los niveles de agua, entre otros (Palma Soto, 2022).

Tabla N°2. Proxies fisicoquímicos del perfil sedimentario (Fuente; adaptado de Palma Soto, 2022).

Componente sedimentario	Origen
Materia Orgánica	Indicador de la productividad biológica en un cuerpo de agua. Puede provenir de la descomposición de plantas, algas y animales. Su concentración también puede indicar cambios en la fuente de nutrientes en el agua, como la entrada de nutrientes desde la cuenca.
Carbonatos	Su fuente de origen es principalmente geológica y biogénica producidos por la descomposición de material orgánico, deposición de estructuras calcáreas y por la precipitación de sales en el agua. Su concentración puede indicar cambios en la química del agua y cambios en sus niveles por evaporación
Susceptibilidad magnética	Relación con la concentración de minerales en sedimentos. La fuente de origen puede ser tanto natural como antropogénica. Los minerales ferromagnéticos pueden ser transportados desde la cuenca a los lagos o pueden ser producidos dentro del lago a través de procesos biogeoquímicos. Además, la actividad humana, como la minería y la quema de combustibles fósiles, también contribuyen a su presencia.
Granulometría	La granulometría es la propiedad que identifica las partículas que componen una roca sedimentaria, un suelo o un terreno en base a sus dimensiones. Permite clasificarlos en función de su tamaño y textura, lo que

	proporciona información sobre su origen, su transporte y su depósito. (Hernández et al., 2023)
--	--

Siguiendo este estudio sobre las concentraciones entre el pasado y la actualidad es que han surgido nuevas aplicaciones, específicamente orientadas a determinar las tasas de erosión del suelo de las cuencas y de sedimentación dentro el cuerpo acuático a lo largo del tiempo (Dearing, 1991), siendo de gran importancia estas investigaciones en relación a problemas de material particulado asociado a contaminantes, y especialmente a erosión acelerada del suelo de la cuenca tributaria (Flower et al., 1989).

3 Metodología

3.1 Área de estudio

La Región de la Araucanía (Figura 9), se enmarca entre los 37° 35' a 39° 37' de latitud Sur y desde los 70° 50' de longitud oeste hasta el Pacífico. Corresponde a un territorio de transición, de los rasgos físicos vigentes en Chile central mediterráneo hacia los del Chile templado de la Región de Los Lagos (Donoso, 2019)

Las muestras de sedimento fueron obtenidas del Embalse Huelehueico (37°49' 18"S 72°30' 34"O) el cual tiene una superficie de 100 ha, y posee una profundidad máxima de 10 metros aproximadamente, se ubica en la comuna de Renaico en la provincia de Malleco (Figura 10), la comuna en la que se encuentra posee una población de 10.250 habitantes (CENSO, 2017) se eligió este embalse debido a su uso de suelo, ya que este presenta una cobertura vegetal de plantaciones forestales en casi la totalidad de la cuenca por lo que su dinámica erosiva estará controlada mayoritariamente por la acción de las plantaciones.

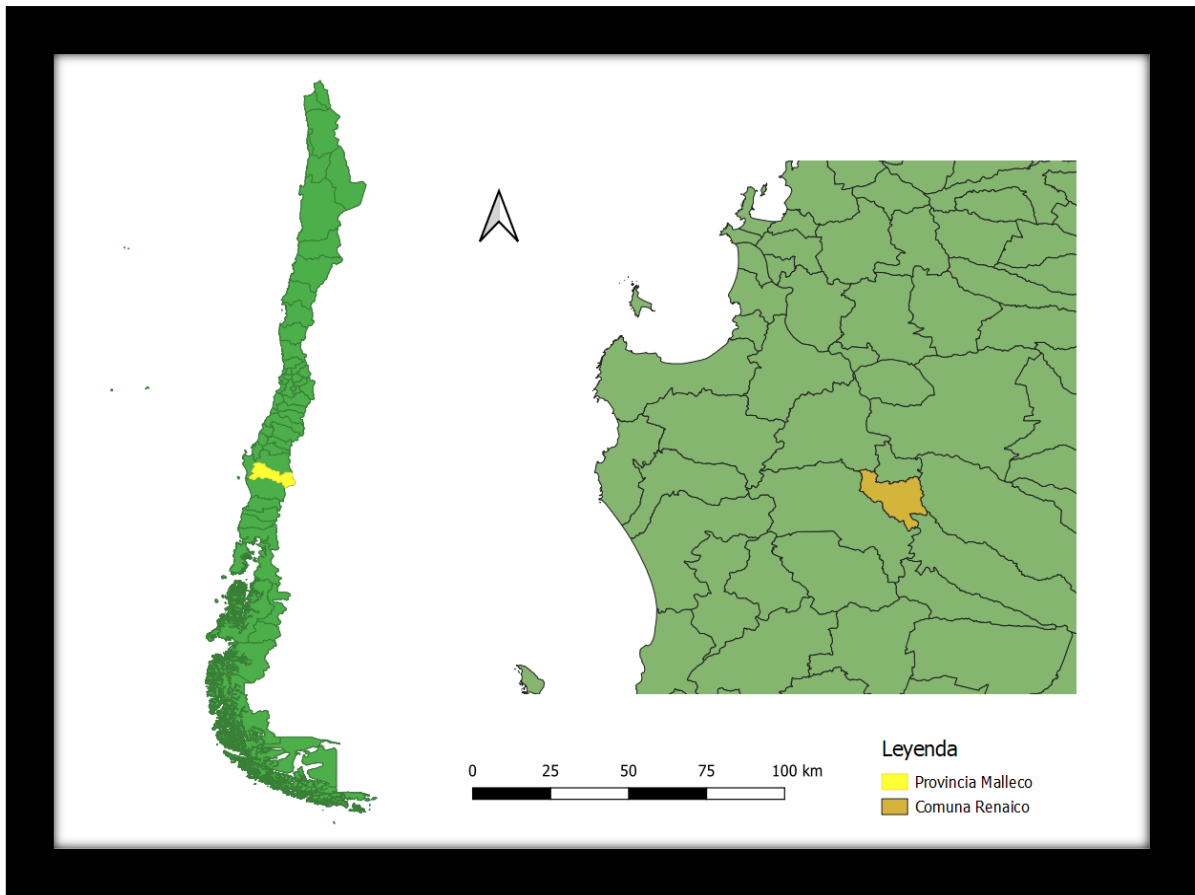


Figura N°9: Comuna de Renaico. Fuente: elaboración propia.

3.2 Análisis físicos y geocronológicos

3.2.1 Extracción de núcleos sedimentarios:

Se utilizó un equipo "gravity corer" marca UWITEC con 4 tubos de plexiglass de 60 cm de longitud y 6 cm de diámetro interno, luego se seleccionó en el sitio de muestreo el punto más profundo con la ayuda de un ecosonda (aproximadamente a 10 m).



Figura N°10: Punto de muestro, Embalse Huelehueico. Fuente: Elaboración propia.

Se retiraron de este punto 4 núcleos sedimentarios, que luego fueron sellados, rotulados y almacenados a una temperatura de 4°C en la cámara de refrigeración del Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile.

3.2.2 Medición de Susceptibilidad Magnética:

Se utilizó el sensor Bartington MS2 para realizar mediciones continuas de susceptibilidad magnética a lo largo de un núcleo sedimentario (Figura 11).



Figura N°11: Medición Continua de Susceptibilidad Magnética.

Se registraron los resultados de las mediciones de susceptibilidad magnética, asociando cada valor con su ubicación específica en el núcleo sedimentario.

3.2.3 Preparación de muestras para análisis de laboratorio:

Previamente a los análisis de laboratorio se secciono el núcleo de sedimento B con una espátula de metal en intervalos de 1 cm de espesor a lo largo de toda su longitud (Figura 12).

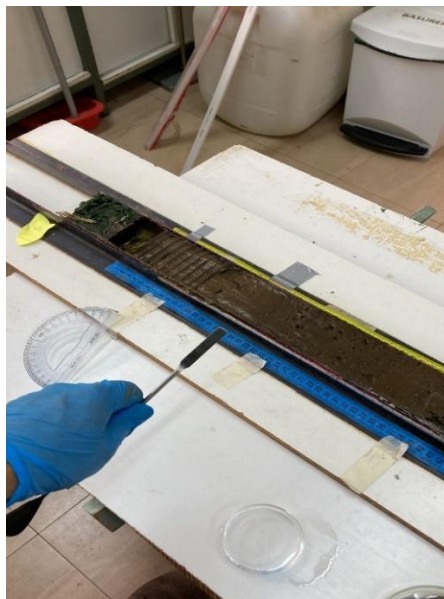


Figura N°12: Seccionado de Core.

Cada muestra de sedimento fresco se colocó en una placa Petri previamente pesada y rotulada, indicando nombre y profundidad (Figura 13).



Figura N°13: Sedimento Fresco en Placa de Petri.

Se registro el peso húmedo de cada muestra mediante una Balanza "Precisa 240A". para luego calentarlas en una estufa a una temperatura de 60°C durante 48 horas, una vez secadas las muestras se volvieron a pesar (Figura 14).



Figura N°14: Pesaje de muestras secas.

Las muestras secas fueron almacenadas en bolsas plásticas, debidamente rotuladas hasta la realización del análisis de materia orgánica total (%LOI550), de carbono inorgánico (%LOI950), granulometría y datación con plomo-210.

3.3 Análisis de laboratorio:

Los análisis de materia orgánica (MO), granulometría y carbono inorgánico (CaCO_3) se realizaron en el laboratorio de sedimentología del Centro EULA, la determinación de materia orgánica total (MOT) en las muestras secas se realizó aplicando el método “pérdida por calcinación” por incremento de temperatura, aproximadamente 1g de sedimento seco se depositó en un crisol rotulado para luego ser calentado a 105°C por 2 horas y luego a 550° por 4 horas (Figura 15), después el contenido de materia orgánica total se determinó aplicando las expresiones propuestas por Boyle (2001), y el resultado se expresa como porcentaje de peso seco.

$$LOI_{550}(\%) = \left(\frac{PS_{60} - PS_{550}}{PS_{60}} \right) \times 100$$

Donde: $LOI_{550}(\%)$ = Porcentaje de materia orgánica en el sedimento; PS_{60} = Peso seco de la submuestra luego de ser secada a 60°C y antes de la combustión y PS_{550} = Peso seco de la submuestra después de la combustión a 550°C (Soto, 2022).



Figura N°15: Extracción de 1g de sedimento seco.

Luego se volvió a calentar la muestra restante, pero esta vez a 950°C, registrándose el peso (PS_{950}) para así obtener el contenido de total de carbonatos ($CaCO_3$) mediante la siguiente formula.

$$LOI_{950}(\%) = \left(\frac{PS_{550} - PS_{950}}{PS_{60}} \right) \times 100$$

Donde: LOI_{950} (%) = Porcentaje de carbonatos en el sedimento; PS_{60} = Peso seco de la submuestra luego de ser secada a 60°C y antes de la combustión, PS_{550} = Peso seco de la submuestra después de la combustión a 550°C y PS_{950} = Peso seco de la submuestra después de la combustión a 950°C (Soto, 2022).

Con respecto a los análisis granulométricos estos se realizaron mediante el instrumento MASTERSIZER-3000 el cual sirve para medir la distribución del tamaño de partículas por

medio de la difracción láser, una vez realizadas las mediciones granulométricas a cada centímetro, estos datos se llevaron al programa GRADISTATv8 para obtener los valores de “Media”, “Selección” y “Asimetría”.

Finalmente fueron enviadas muestras secas de aproximadamente 3 gramos de los primeros 21 centímetros del testigo sedimentario, para su análisis radioisotópico de ^{210}Pb y ^{137}Cs , al laboratorio ambiental “Flett Research Ltd.” Ubicado en Winnipeg, Manitoba, Canadá. para así mediante un modelo geocronológico poder datar la muestra de sedimento.

3.4 Cronología Isotópica

El uso de los depósitos sedimentarios se basa en la premisa que los sedimentos mas recientes se van acumulando sobre los estratos sedimentarios mas antiguos. Esta ley de superposición de estratos señala cuales capas fueron depositadas primero, pero no indica la edad real de ninguna de ellas. Por tal razón es necesario asignarle una edad absoluta (en años) (Soto, 2022)

Para asignar esta edad absoluta al sedimento es que se utiliza el modelo geocronológico, que se logra a partir de isótopos radioactivos, los cuales se fundamentan en las series de desintegración de isótopos con tasas constantes de decaimiento radioactivo.

3.4.1 Fundamento metodológico de la geocronología (^{210}Pb)

Para la cronología de eventos recientes, donde se pretende estudiar, por ejemplo, la influencia antropogénica en un cuerpo de agua, el método más utilizado es el de ^{210}Pb -

^{137}Cs . Debido a su rango dinámico, que abarca únicamente los últimos 150 años (Azcune et al, 2020).

La presencia del isótopo natural ^{210}Pb en los sedimentos es el resultado del decaimiento isotópico de la serie del ^{238}U . Cuenta con una vida media de 22,26 años, es decir, que transcurrido este periodo la actividad del isótopo se reduce a la mitad y así continuamente (Figura 16). En cambio, el ^{137}Cs se considera un radioisótopo artificial que ha sido introducido al medio ambiente como resultado de las pruebas de armas y accidentes nucleares. La actividad total del ^{210}Pb en los sedimentos tiene dos componentes. El ^{210}Pb “sostenido”, que es producto del decaimiento *in situ* del isótopo padre ^{226}Ra al interior de las partículas individuales de suelo o roca. Este es transportado hacia el interior del lago en forma particulada (incluyendo al ^{226}Ra asociado) como parte de los ingresos de materiales producidos por la erosión de la cuenca de drenaje (Cisternas, 1999).

Si bien en sistemas cerrados la serie de decaimiento del ^{238}U debería estar en equilibrio, en sistemas abiertos este equilibrio se rompe por el escape a la atmósfera del Rn^{222} , gaseoso. El ^{222}Rn , radionucleido de $t_{1/2}=3.8$ días, ya en la atmósfera, decae de manera sucesiva a través de varios radionucleidos a ^{210}Pb , el cual se asocia con aerosoles, precipitándose con la lluvia en zonas continentales y alojándose por escorrentía en el sistema sedimentario reciente de sistemas continentales lénticos u oceánicos (Azcune. et al, 2020).

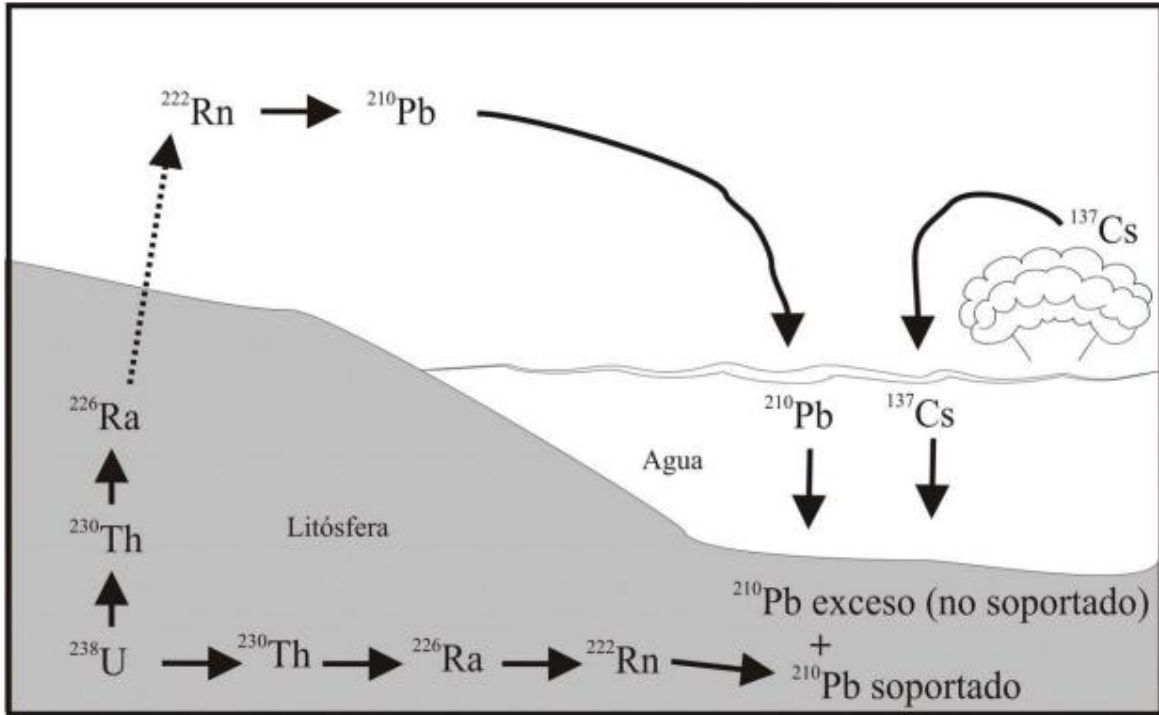


Figura N°16: Esquema simplificado del decaimiento radioactivo del ^{238}U . Fuente: Bernal et al. (2010).

En los sedimentos, se considera que el ^{210}Pb sostenido está en equilibrio radioactivo con el ^{226}Ra y así la actividad no sostenida, a un nivel determinado, se obtiene por la diferencia entre la actividad del ^{226}Ra y el total del ^{210}Pb o, por la diferencia entre el ^{210}Pb total y el valor promedio del ^{210}Pb en los estratos más profundos de la columna, asumiendo total ausencia de ^{210}Pb no sostenido (Por decaimiento natural) (Cisternas, 1999).

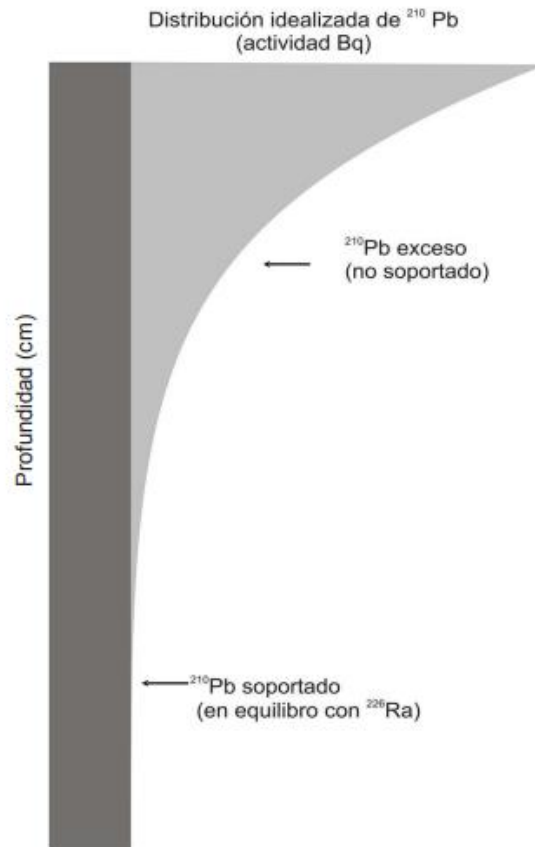


Figura N°17: Distribución Idealizada del ^{210}Pb Fuente: Bernal et al. (2010).

El perfil de actividad de ^{210}Pb en sedimentos de ~100 años, permite calcular la edad del sedimento utilizando principalmente los siguientes modelos:

Tabla N°3: Modelos Geocronológicos. Fuente: (Cisternas, 1999).

Modelo	Utilización
CF:CS (Flujo constante/Sedimentación constante)	Utilizada para datar perfiles lineales de actividad, es decir, al aplicar una escala logarítmica sobre la actividad, se obtiene un perfil rectilíneo, producto de una curva definida solo por la ley de decaimiento radioactivo. No puede ser utilizado en perfiles influenciados por mezcla sedimentaria o procesos físico-químicos que produzcan una dilución del isótopo.
CIC (Concentración inicial constante)	Su aplicación es factible en aquellos ambientes, en que la sedimentación esté dominada principalmente por la llegada de partículas provenientes del lavado de la cuenca, ya que se asumen que siempre existe una concentración inicial constante de ^{210}Pb en la interfase agua-sedimento, independientemente de los cambios que se produzcan en la tasa de acumulación.
CRS (Tasa de suministro constante)	Este modelo asume que existe un flujo constante, desde la atmósfera de ^{210}Pb al sedimento, independientemente de los cambios que se puedan producir en el ingreso de materiales al lago. De esta forma, dicho modelo considera las variaciones, generalmente ocasionadas por intervención antrópica, en las tasas de sedimentación, que generan perfiles no lineales, producto de los fenómenos de dilución del isótopo.

Es importante mencionar que para cumplir estos modelos geocronológicos se presuponen las siguientes premisas.

- Existe un flujo constante de ^{210}Pb atmosférico hacia el sistema
- El ^{210}Pb atmosférico no presenta movilidad post-depositacional dentro del sedimento
- No existe pérdida de ^{210}Pb desde el sedimento hacia el agua de un sistema lacustre. Los sedimentos lacustres son considerados como un sistema cerrado con respecto al sedimento y los flujos de ^{210}Pb .
- La concentración de ^{210}Pb disuelto en las aguas de sistemas lacustres es prácticamente cero.
- El ^{210}Pb tiene un tiempo de residencia atmosférico relativamente corto en relación con el tiempo de residencia de un sistema lacustre, de tal forma que el ^{210}Pb atmosférico que alcanza la columna de agua es rápidamente transferido al sedimento (Bernal et al., 2010).

3.5 Registro de datos:

Registrar los resultados de los análisis de laboratorio asociados a cada muestra, manteniendo un registro organizado que incluya la información de nombre, profundidad y resultados de los análisis.

3.6 Análisis de polen

3.6.1 Extracción de sedimento y secado:

Se extrajeron entre 3 y 4 cc de sedimento húmedo con una jeringa para luego colocar las muestras en un horno a 21-25°C durante 24 horas, simulando un secado a temperatura ambiente.

3.6.2 Molienda y preparación de tubos de ensayo:

Después del secado, se molió el sedimento seco con un mortero y se agregó cada muestra a un tubo de ensayo marcado.

3.6.3 Ataque con ácido fluorhídrico (HF):

Se atacaron las muestras con ácido fluorhídrico al 40%, para luego colocarlas en un baño maría por 10 minutos a 80°C para así eliminar los silicatos. Luego, se lavó con agua destilada, se centrifugo y se desechó el sobrenadante. Este proceso de lavado se repitió tres veces.

3.6.4 Tratamiento con solución acetolítica y montaje para análisis microscópico:

Seguido de esto se procedió a lavar las muestras con ácido acético, se centrifugaron y se desechó el sobrenadante, este proceso también se repitió 3 veces, debido a que la solución acetolítica tiene una mala reacción con el agua, después se preparó una solución acetolítica (anhídrido acético: ácido sulfúrico en proporción 9:1) y se atacaron las muestras con la dicha solución para después dejarlas reaccionar en baño maría por 20 minutos a 80°C y así eliminar la materia orgánica. Luego se procedió a lavar, centrifugar y desechar el sobrenadante con ácido acético en primera instancia y después con agua destilada.

Finalmente, se montaron las muestras y se dejaron secar para el análisis posterior en el microscopio fotónico.

3.6.5 Conteo de Polen

Se procedió a realizar el conteo de los granos de polen de pino en cada centímetro, para esto se utilizó un microscopio óptico OLYMPUS CX31 y un aumento de 40x, se extrajeron 2 gotas (0,037ml/gota) de cada muestra en específico, las cuales fueron depositadas en un portaobjetos que luego se utilizó en el microscopio, los granos de polen de pino son muy característicos debido a su tamaño, y morfología globular.

3.7 Análisis histórico

Se realizará la recopilación, selección y análisis de los materiales bibliográficos disponibles, dando preferencia a la información fehaciente de primer orden como crónicas y documentos históricos concretos de los siglos a estudiar, que directa o indirectamente aludan a la situación ambiental del área de estudio. Los datos históricos se complementan con información obtenida de trabajos científicos geográficos, históricos, monográficos y contemporáneos (desde el siglo XX). Aplicando el método mixto de progresión y regresión histórica (Bolós, 1992). El método mixto describe el paisaje desde la época actual a la pasada y a la vez, reconstruye el paisaje desde un determinado momento hasta la actualidad, permitiendo el establecimiento de hipótesis de trabajo y su posible comprobación (Bolós, 1992).

4 Resultados

3.1 Análisis Histórico

Desde tiempos prehispánicos han ocurrido cambios en el paisaje ecológico chileno, asociados principalmente a la acción del hombre al despejar la tierra para su labranza (Bengoa, 1991; Chonchol, 1994; Dillehay, 1990). Sin embargo, de acuerdo a varios autores (Nuñez, 2000; Torrejón & Cisterna, 2002; Otero, 2006) las modificaciones en el paisaje natural, especialmente de la vegetación, se incrementaron de manera notoria con la llegada de los colonizadores españoles al territorio de Chile en 1536, siendo las regiones ubicadas entre Valparaíso y Biobío las que han sufrido cambios más importantes desde entonces (Camus, 2006).

Es por eso que, para tener un claro conocimiento del terreno a estudiar se separara en dos temas la investigación histórica, por un lado, tenemos el 1) “Cambio del paisaje en la zona de estudio”, la provincia de Malleco y sus alrededores, y por otro, 2) “El avance de las plantaciones forestales a lo largo de Chile y, particularmente, en la zona de Malleco”; lo anterior, con el fin de unir ambas temáticas hacia finales del siglo pasado, momento en el que se introducen las especies forestales exóticas en el área de estudio.

3.1.1 Cambio del paisaje en la zona de estudio.

Los primeros registros escritos referidos a la zona sur de Chile provienen de la expedición realizada por el conquistador español Pedro de Valdivia en 1546, donde el cronista Jerónimo de Bibar relata las condiciones ambientales que observo en ese momento, gracias a esto se sabe que, “antes de la llegada de los conquistadores españoles, el espacio que

actualmente conforma la Provincia de Arauco formaba parte del territorio que ocupaban los mapuche, que en general comprendía, de Norte a Sur, el espacio geográfico ubicado entre los ríos Itata y Toltén” (Rosenblitt 2005).

Esta cultura indígena se encontraba en un estado de desarrollo proto-agrario, esto es, conocían la reproducción de ciertas especies vegetales en pequeña escala, pero no habían desarrollado aún una agricultura propiamente tal, la base de la alimentación era la papa y los porotos pallares. Estos se cultivaban en “claros de bosques”, en terrenos de vegas de gran fertilidad por su humedad; en fin, en terrenos que no exigían una gran preparación. Las continuas lluvias del sur permitían el desarrollo de estos productos; esto explica la ubicación en terrenos pluviosos de la mayor parte de la población. La papa, principalmente, requería de una tecnología hortícola relativamente simple; se hacía un hoyo con un palo excavador, se sembraba y se rellenaba de tierra. Las lluvias regaban naturalmente la semilla y se esperaba la cosecha. (Bengoa 1985)

Paralelamente, la relativa simplicidad de herramientas y técnicas involucradas en la producción agrícola mapuche, sumadas al carácter extensivo de los cultivos, permitió la sustentabilidad del sistema (Bengoa 1991).

Las rotaciones y diversidad de especies vegetales habrían promovido también la retención de nutrientes del suelo y mecanismos de auto control biológico. Desde el punto de vista del paisaje, los policultivos indígenas se caracterizaban por ser miméticos, complejos e integrativos, imitando a los ecosistemas naturales, que no eran agredidos con trabajo animal ni arado (Torrejón 2002).

Respecto a la ganadería, se trataba de una faena criancera extensiva y de pequeña escala. Las llamas (chilihueques u ovejas de la tierra), además de la carne, proporcionaban materias primas indispensables (e.g., lana) para cubrir las necesidades básicas de los

indígenas (Torrejón 2002). Aun cuando esta actividad de crianza se encontraba ampliamente expandida entre las familias mapuches (Bengoa 1991).

También su subsistencia descansaba mucho en la recolección de variados frutos y raíces disponibles en las frondosas selvas araucanas, de pescados, mariscos y algas en los sectores costeros y, en la cría del chilihueque, un pequeño auquénido oriundo de la región (Rosenblitt 2005).

El terreno a estudiar se mantuvo de manera estable en cuanto a la agricultura, deforestación y otras formas de alteración del paisaje, tanto antes de la llegada de los españoles como hasta el fin de su dominio, con la formación del Estado Chileno tras la Guerra de Independencia (1813-1829). Esto debido a que los españoles nunca lograron establecerse plenamente en la zona a causa de la fuerte presencia Mapuche, salvo en algunas ciudades y fuertes como Angol, Cañete y el fuerte Tucapel que fueron fundados y refundados repetidamente debido a los constantes conflictos con los indígenas.

Pero todo cambia cuando la recién formada República de Chile, a mediados del siglo XIX, pone su mirada en la región, debido a imperativos económicos como se destaca en el siguiente boletín lanzado por la Sociedad Nacional de Agricultura:

“¿Para qué sirven los inmensos tesoros diseminados de norte a sur de la república si no se les explota? (...) Si en las regiones apartadas la barbarie secular se halla todavía en pugna con la civilización improvisada, no pasarán muchos años sin que aquélla tenga que ceder delante de la inmigración y colonización” (Menadier, 2012, p. 40 y 548).

Es así como se procede a la llamada pacificación de la Araucanía, con el fin de incorporar el territorio mapuche al dominio efectivo de la República y así obtener ganancias económicas gracias a la agricultura, la ganadería, la extracción de carbón mineral y otras empresas propias de la época. Es necesario comentar que ya había presencia de colonos

en la zona, sobre todo hasta el Río Malleco donde existía una agricultura intensiva pero pasado este territorio, la mayoría de habitantes eran mapuches, con prácticas mayoritariamente ganaderas, sin mucha intervención del paisaje; pero fue bajo el gobierno de José Joaquín Prieto que se dio un nuevo impulso a la conquista militar, con la implementación de una línea de fortificaciones en resguardo de los nuevos habitantes. Además, la estrategia de construir varias instalaciones militares a corta distancia, permitió una mayor concentración de soldados para organizar y también proteger a los “nuevos habitantes” que debían poblar estas tierras (Guevara, 1902).

Estos nuevos habitantes fueron, además de los chilenos, colonos que venían en su mayoría de Europa gracias a la nueva ley de colonización que promulgo el gobierno en 1874, que buscaba favorecer el poblamiento de la Araucanía: además de la creación de la “Agencia General de Colonización e Inmigrantes para Europa”, que organizó la venida de inmigrantes, como también publicitó los beneficios de emigrar a Chile. Los colonos se asentaron principalmente en tierras fértiles mediante la adquisición de pequeñas y medianas propiedades, especialmente en las provincias de Malleco y Cautín, establecidas en 1887.

Es así como el arduo trabajo de los colonos extranjeros y chilenos, que compraron tierras al fisco, generó un auge de los cultivos cerealeros como el trigo y avena principalmente, pero para poder cultivar primero se tuvo que crear el entorno propicio, lo que se logró transformando los ecosistemas boscosos del Territorio como lo refleja Gustave Verniory, Ingeniero Belga que construyó las principales líneas de ferrocarril del siglo XIX, cuando señala: “Jamás me imaginé estos árboles desconocidos, estas plantas trepadoras originarias del país, cubiertas de flores deslumbrantes de color rojo, llamadas ‘copihues’ [...] estas masas compactas de quilas, especie de bambúes muy altos, que se enredan

unas contra otras. Toda esta verdura forma arcadas sobre nuestras cabezas” (Ulloa *et al.*, 2022).

Existen también descripciones más detalladas de las especies que allí se encontraban, como las realizadas por Federico Albert, que reconoció 21 especies arbóreas.

Tabla N°4: Especies arbóreas. Fuente: Escalona-Ulloa 2021.

Especie	Zona Malleco	Zona Cautín
<i>Abies pectinata</i>	x	x
<i>Acacia melanoxylon</i>	x	
<i>Cupressus macrocarpa</i>	x	
<i>Cupressus torulosa</i>	x	
<i>Eucaliptus resinifera</i>	x	
<i>Eucalyptus globulus</i>	x	
<i>Eucalyptus resinifera</i>	x	
<i>Eucalyptus viminalis</i>	x	x
<i>Fraxinus excelsior</i>	x	x
<i>Picea excelsa</i>	x	x
<i>Pinus excelsa</i>	x	x
<i>Pinus insignis</i>	x	
<i>Pinus maritima</i>	x	
<i>Pinus silvestris</i>	x	x
<i>Pinus canariensis</i>	x	
<i>Pseudotsuga taxifolia</i> (pino oregon)	x	x
<i>Quercus pedunculata</i>	x	x

<i>Robinia pseudacacia</i>	x	x
<i>Sequoia sempervirens</i>	x	x
<i>Thuia plicata</i>	x	x

Es así como estos territorios de las provincias de Malleco y Cautín, fueron ecosistemas donde se orientó el proceso de plantación de especies exóticas las que fueron profusamente introducidas, eliminándose extensas áreas de bosque nativo. Además, se realizó una intensa explotación comercial del bosque nativo, para lo cual se requirió del uso de tecnología de punta, que permitió acelerar el proceso y con ello posibilitar la creación de industrias madereras (Klubock, 2014). El bosque nativo fue un recurso clave para los colonos asentados en la zona, permitiéndoles desarrollar vías de comunicación, mercados e infraestructura crítica. Paralelamente y como iniciativa gubernamental, desde 1862 se inició la construcción de un ferrocarril hacia el sur. Su construcción implicó no solo el despeje del área de bosque por donde la línea férrea corría, sino también la tala para fabricar con madera los durmientes necesarios para la línea férrea (Otero, 2006).

A medida que avanzaban los años también cambiaba el paisaje del sur para dar lugar al desarrollo propio del siglo XIX, tal como se observa en la Figura 18.



Figura N°18: Explotación del bosque en cercanías de Temuco, febrero de 1895. Fuente:
Escalona-Ulloa 2021.

El ferrocarril se constituyó en el medio de transporte gravitante en la ocupación de la Araucanía, ya que se intentó la navegación a vapor, pero esta tuvo diversas limitaciones, es por esto que debido a los grandes excedentes productivos que tenía el territorio incorporado, fue necesario crear una vía de transporte apropiada que fuera rápida, pero a la vez segura. La llegada del tren permitió movilizar la producción de trigo al interior del “anillo” de fortificaciones y comercializarlo en los centros poblados que empezaron surgir en torno a los antiguos fuertes militares (Ovalle, 1912). Luego 1890 fue inaugurado una de las obras arquitectónicas más relevantes del país, el Viaducto del Malleco, puente ferroviario de gran tamaño, que sirvió de enlace para trasladar la creciente producción de trigo que se generaba en las fértiles tierras del sur, hacia Concepción y Valparaíso. El ferrocarril continuó extendiéndose por toda la provincia de Malleco. Se construyeron ramales y estaciones que posibilitaron que el tren pudiera conectar aquellos intersticios cercanos a los campos que tenían una producción importante de cereales. Esto permitió asegurar el traslado de los granos hacia las principales capitales departamentales y con ello dar vida a

los molinos que contribuían de forma importante a la economía local y al crecimiento urbano (Ulloa et al., 2022).

Según los registros documentales de la época, desde la provincia del Biobío al sur el trigo era el principal cultivo no irrigado, destacando el papel de los trigos de primavera debido a su buena adaptación, otras cosechas también fueron la cebada, la avena o las papas, es así como a medida que la zona se iba poblando y sus ciudades iban creciendo, también lo hacían los procesos asociados al trigo y su explotación, como serían los molinos de Bunster, conocido como el “rey del trigo”: “El establecimiento de molienda del señor Manuel Bunster es uno de los mejor montados [...] es de cilindros automáticos, pudiendo elaborar diarios hasta 200 quintales de harina de la mejor calidad. Posee alumbrado de luz eléctrica en todos sus departamentos” (Mansoulet, 1898).

Por aquella fecha (1899) aparece también la primera descripción del cerro Huelehueico, entonces conocido como “cerro Gualihueico” el cual. “situado sobre el límite oriental del departamento de Angol en los 37° 43' Lat. y 72° 30' Lon. hacia el E de su capital. Es la eminencia más notable de un serrijón prolongado de sudeste a noroeste, vestido de bastante arbolado y cuyas faldas y con tornos son de suave declive y terrenos cultivables. Vecina al S. sobre sale otra eminencia más baja, dicha Pichi-Gualihueico (pichi es chico), entre las cuales existió en el siglo pasado una reducción de indios” (Astaburraga, 1899). El nombre Huelehueico podría provenir del término hualhue, gualhue: terrenos húmedos y pantanosos en grado bien diferente: unos se secan en verano y se cultivan, de hua o uhua: maíz, el: en favor de algo y hue: lugar; en resumen, lugar apto para el cultivo de maíz, maizal, chacra (Meyer, 1952).



Figura N°19: Mapa de la provincia de Malleco 1887. Fuente: Biblioteca Nacional de Chile.

En la época también se comienzan a formar los primeros fundos de gran tamaño en la zona, que serían dos, ubicados en las cercanías de Angol y colindantes a la ubicación del Cerro Huelehueico, uno de estos sería el “Fundo El Parque” el cual se encuentra a 2 km de Angol, con 650 cuadras de extensión de terrenos planos, divididos en once potreros, irrigados por agua que obtienen del Canal Malleco: “Esta propiedad se dedica especialmente al cultivo de la Chácara, á las siembras de cebada y á la producción de pastos, que, en este último tiempo, ha tomado inesperado cuanto asombroso desarrollo. Especialmente esmero se consagra á la plantación de árboles frutales y de adorno; llama la atención un magnífico parque en donde abundan éstas, como asimismo plantas de flores de infinitas variedades.

Tiene el fundo vacuno de raza Durham y ganado ovejuno de Lincoln. En conclusión, el sobresaliente de este fundo es la cebada, el trigo y los pastos” (Mansoulet, 1898).

El otro fundo que se encontraba en producción en aquella época era el fundo Miraflores, ubicado a la salida del pueblo Huequén. Con una extensión de 400 cuabras de terrenos aptos para el cultivo, dedicados especialmente al cultivo la cebada y la producción de pastos en gran escala: “Se halla dividido el fundo en 14 potreros, regados por un canal que trae agua del río Malleco. Una viña de algunas cuabras de extensión produce uvas de varias clases y de excelente calidad. Esta viña tiene pocos años de explotación y da un rendimiento espléndido. La ganadería es otro de los ramos especiales de explotación de este fundo; posee vacunos mestizos de raza fina y ovejas de “Lincoln”, en resumen, el cultivo principal á que se dedica este fundo es la siembra de trébol, alfalfa y otros pastos, las siembras de cebada y de trigo que dan un rendimiento medio de 15 á 25 por uno.” (Mansoulet, 1898).

Con el pasar de los años, las malas prácticas en el cultivo, incidieron en el rendimiento agrícola de la zona, que fue decayendo debido al agotamiento y deterioro de los suelos como resultado de la intensiva producción de cereales.

Tabla N°5: Rendimiento por hectárea en Malleco. Fuente: Elizalde, 1958. “La sobrevivencia de Chile. La conservación de sus recursos naturales renovables”.

Rendimiento por Hectárea en Malleco	
Periodo	Quintales Métricos por Hectárea (qqmm/há)
1870-1890	55 qqmm/há
1900	15 qqmm/há
1911-1917	10.5 qqmm/há
1932-1939	7 qqmm/há

Como se observa en la tabla anterior la producción de la zona disminuyó casi en un 87% desde el periodo de 1870 a 1932. “Los fértiles suelos abonados por el humus secular rindieron en los primeros años las más pingües cosechas de trigo de que se tiene memoria en Chile. El mundo entero se maravillaba de la prodigiosa tierra araucana que producía hasta 55 quintales por hectárea y les proporcionaba pan a los pueblos tan lejanos como el de California, Australia y Nueva Zelandia. Pero pronto cundió el engaño porque los pocos científicos agricultores, entusiasmados con el dorado proyecto de exportar el cereal a aquellos ricos mercados, se ensañaron con los suelos, exigiéndoles más de lo que podían rendir, dedicándolos exclusivamente al monocultivo y en su ímpetu codicioso descuajaron tanto los faldeos y lomajes como el terreno plano para sembrar solo trigo.” (Elizalde, 1958).

Junto a la gran producción agrícola en la provincia, se debe agregar la explotación forestal; la suma de ambas actividades económicas dejó sin protección arbórea las cuencas hidrográficas, embancándose ríos e intensificándose la erosión de forma progresiva en la zona, ya que esta explotación se realizó sin conocimientos técnicos adecuados, recurriendo

frecuentemente a la práctica de roza y quema. Esta técnica consistía en talar los árboles y plantas leñosas de un área para luego quemar la biomasa, generando una capa de ceniza rica en nutrientes que temporalmente mejoraba la fertilidad del suelo. Aunque eficaz en el corto plazo, este método contribuyó a la degradación del ecosistema y la pérdida de biodiversidad a largo plazo. “En efecto la elevación de la temperatura que sube hasta 44°C en las inmediaciones de un roce, experimenta un descenso rápido que rompe el equilibrio atmosférico y causa ráfagas y lluvias violentas y repentinas” (Elizalde, 1958).

A inicios del siglo XX comienza la construcción del Embalse Huelehueico, el que dará origen a la Laguna Huelehueico, como se observa en la propuesta pública del Ministerio de Fomento, publicada en el diario La Nación de 1928 (Figura 20).



Figura N°20: Licitación Tranque Huelehueico. Fuente: Diario La Nación 1928.

Además del siguiente texto extraído de la Sesión del Congreso Pleno el 21 de mayo de 1931, donde se da cuenta del avance de las obras publicas realizadas por la gestión presidencial a cargo en esos años (Figura 21).

Construcción

Durante el año ha habido 27 obras en ejecución con un presupuesto total de 203.000,000 pesos, del cual se encuentra contratado 128.000,000. Estas obras permitirán regar 225,000 hectáreas.

Las siguientes son las obras que estuvieron en construcción el año 1930 y cuya inversión alcanzó a 31.690,264 pesos 13 centavos: Caritaya, Pintanane y Pachica, contratadas por la Compañía General de Construcciones; Junta del Carmen, La Laguna y Recoleta, contratadas con Ulen & Co.; Cogotí, Huintil y Bullileo, contratadas con J. G. Whitte & Co.; 4 embalses de Casablanca que construye Bosso y Casalia; el canal de Chacabuco y Regadío de Polpaico, contratados con Mac Donald Gibbs; y el embalse de Puente Negro y Lautaro. Además de estos contratos se pueden mencionar los embalses de Culino, Lolol y Huelehueico y los canales de San Cristóbal y Colicheo que están por terminarse y hacen un total de 21 obras.

Figura N°21: Sesión del Congreso 1931. Fuente: Biblioteca Nacional.

Es importante mencionar que desde esta fecha en adelante la información bibliográfica se vuelve más escasa por lo que se realizó una entrevista de campo a don Raimundo Calvo, dueño del embalse para así poder obtener información mas reciente de la zona de estudio.

3.2 Análisis sedimentológicos

3.2.1 Cronología Embalse Huelehueico.

El presente documento analiza las variaciones de distintos parámetros medidos en un perfil sedimentario, representados en distintos grafico que varían en función de la profundidad (cm). Cada gráfico corresponde a un parámetro específico: concentración de polen de pino, susceptibilidad magnética (SM), porcentaje de pérdida por ignición a 950 °C (% LOI 950) y porcentaje de pérdida por ignición a 550 °C (% LOI 550). A continuación, se detalla la descripción de cada uno de estos parámetros y su interpretación a lo largo del perfil.

3.2.2 Susceptibilidad Magnética (SM $\times 10^{-8}$)

La susceptibilidad magnética nos indica la composición mineralógica de los sedimentos, en la capa más superficial, se presenta un valor inicial muy bajo, siendo el cm 1 el que presenta el valor más bajo a lo largo de la columna sedimentaria con 22×10^{-8} , para luego aumentar significativamente a 83.55×10^{-8} en el cm 2 y alcanzando 106.80×10^{-8} en el cm 3, este incremento en los valores nos puede indicar un incremento en la presencia de minerales magnéticos a lo largo del perfil, luego los valores tienden a estabilizarse presentando valores que van desde 94.55×10^{-8} en el cm 5 hasta 106×10^{-8} en el cm 12 lo que podría indicar un periodo estable en la cuenca con respecto a las condiciones mineralógicas.

A partir del cm 13 se observa una subida en los valores de susceptibilidad magnética, comenzando con $117,25 \times 10^{-8}$ para luego continuar con 130×10^{-8} en el cm 14, lo que podría indicar un mayor aporte de minerales magnéticos a la cuenca

Los valores siguen incrementando constantemente para finalmente en el cm 18 presentar un gran aumento llegando a las $181,05 \times 10^{-8}$, y luego en el cm 20 presentar el valor máximo de susceptibilidad magnética a lo largo de la columna sedimentaria con 273×10^{-8} . Este comportamiento nos podría indicar un cambio significativo en la cuenca y las condiciones ambientales, posiblemente asociado con un mayor aporte de minerales magnéticos al cuerpo de agua.

3.2.3 Porcentaje de Pérdida por Ignición a 950 °C (% LOI 950/Materia Orgánica)

La materia orgánica (%LOI 550) presenta una rápida disminución en las capas superficiales, para luego estabilizarse en las capas intermedias y profundas, los valores iniciales comienzan con 17,51% en el cm 1 pero este porcentaje disminuye abruptamente en el cm 2 con un 14,81% y a 12,69% en el cm 4, este descenso nos podría indicar una fuerte oxidación de la materia orgánica en las capas más superiores.

Luego los valores tienden a estabilizarse específicamente entre los centímetros 5 y 14 respectivamente, variando desde 13,10% en el cm 5, 12,80% en el cm 6 y 12,59% en el cm 8 así se mantiene sin grandes fluctuaciones hasta el cm 14 donde presenta un valor de 12,49% lo que sugiere condiciones de equilibrio a lo largo de la cuenca y también en el aporte y degradación de materia orgánica durante ese periodo.

En el 15 cm se puede observar un ligero incremento en la materia orgánica con valores como 14,69% en ese centímetro en específico, para luego seguir con valores relativamente constantes hasta el final del sedimento, como 14,91% en el cm 17 y 14,96% en el cm 20 lo que indica un aumento en el aporte de materia orgánica al sedimento y que luego tiende a estabilizarse a lo largo de los tramos finales de la columna.

3.2.4 Porcentaje de Pérdida por Ignición a 550 °C (% LOI 550/Materia Inorgánica)

La cantidad de compuestos inorgánicos (%LOI950) como carbonatos en el sedimento presenta una disminución gradual a lo largo del perfil, en especial en las capas profundas.

En las capas superficiales del sedimento, los valores iniciales van desde 3,15% en el cm 1 hasta 2,92% en el cm 3 para en el cm 4 presentar una ligera disminución con 2,66% lo que nos podría indicar una disminución de la disponibilidad de compuestos inorgánicos en el

sedimento, entre los cm 5 y 14, los valores fluctúan entre 2,82% y 3,47%, manteniéndose estables en ese periodo, lo que nos refleja que hubo pocos cambios en el terreno y en los procesos de formación y deposiciones de compuestos orgánicos.

A partir del cm 15, los valores comienzan a disminuir constantemente, registrándose 2,36% en el cm 16, 2,33% en el cm 17 y 2,34% en el cm 18, esto nos indica un descenso en los compuestos inorgánicos en el sedimento, atribuible posiblemente a una mayor cubierta vegetal a lo largo de la superficie de la cuenca, luego los porcentajes siguen disminuyendo, llegando a 2,14% en el cm 21 del testigo sedimentario lo que nos indica que la tendencia es a un menor aporte inorgánico a los sedimentos.

3.2.5 Media logarítmica en phi obtenida mediante análisis granulométricos.

La clasificación del tamaño de grano en el sedimento presenta una marcada tendencia hacia los granos mas gruesos, en especial en las capas más superficiales.

En las capas mas superficiales del sedimento se observa que la media varia entre los valores 3 y 4, lo que nos indicaría arena muy fina para los valores cercanos a 3 y limo muy grueso para los valores más cercanos a 5, esto se observa desde el centímetro 0 hasta el centímetro 11.

Luego desde el centímetro 12 se observa una drástica disminución en el tamaño de grano llegando a valores que varían entre 6 y 7, los valores mas cercanos a 6 serian limos medios mientras que los valores mas cercanos a 8 tienen una clasificación de limo fino, esto se mantiene constante hasta el centímetro 19 donde la media disminuye a un valor de 5,77 lo que clasifica como limo grueso, para después volver a subir su valor de media a 7 clasificándose como limo fino.

3.2.6 Selección en phi obtenida mediante análisis granulométricos.

La granulometría obtenida en el núcleo sedimentario presenta una tendencia a empeorar la selección a medida que se llegan los centímetros superiores.

Los primeros centímetros presentan una variación de la selección pasando desde poco seleccionado con valores mas cercanos a 2 a muy poco seleccionado con valores mas cercanos 3, esto se mantiene hasta el centímetro 12.

Luego los próximos centímetros presentan una leve mejoría en la selección, pero aun dentro del criterio de poco seleccionado, con valores más cercanos a 1.

3.2.7 Asimetría en phi obtenida mediante análisis granulométricos.

Con respecto a la asimetría que presenta el núcleo sedimentario esta a tenido un cambio en los centímetros superiores con una tendencia hacia lo grueso.

Los primeros centímetros tienen valores que varían entre 0 y 2, lo que nos indica una simetría gruesa para los valores entre 0,43 y 1,30 y los valores que superan ese rango como los centímetros 5 y 10 presentan una asimetría aún más gruesa.

Luego se observa una disminución en los valores de asimetría, desde el centímetro 12 hasta el centímetro 18 todos los valores se encuentran entre 0,105 y 0,272 lo que nos indica una tendencia hacia granos mas finos, para finalmente desde el centímetro 19 volver a presentar una asimetría más gruesa.

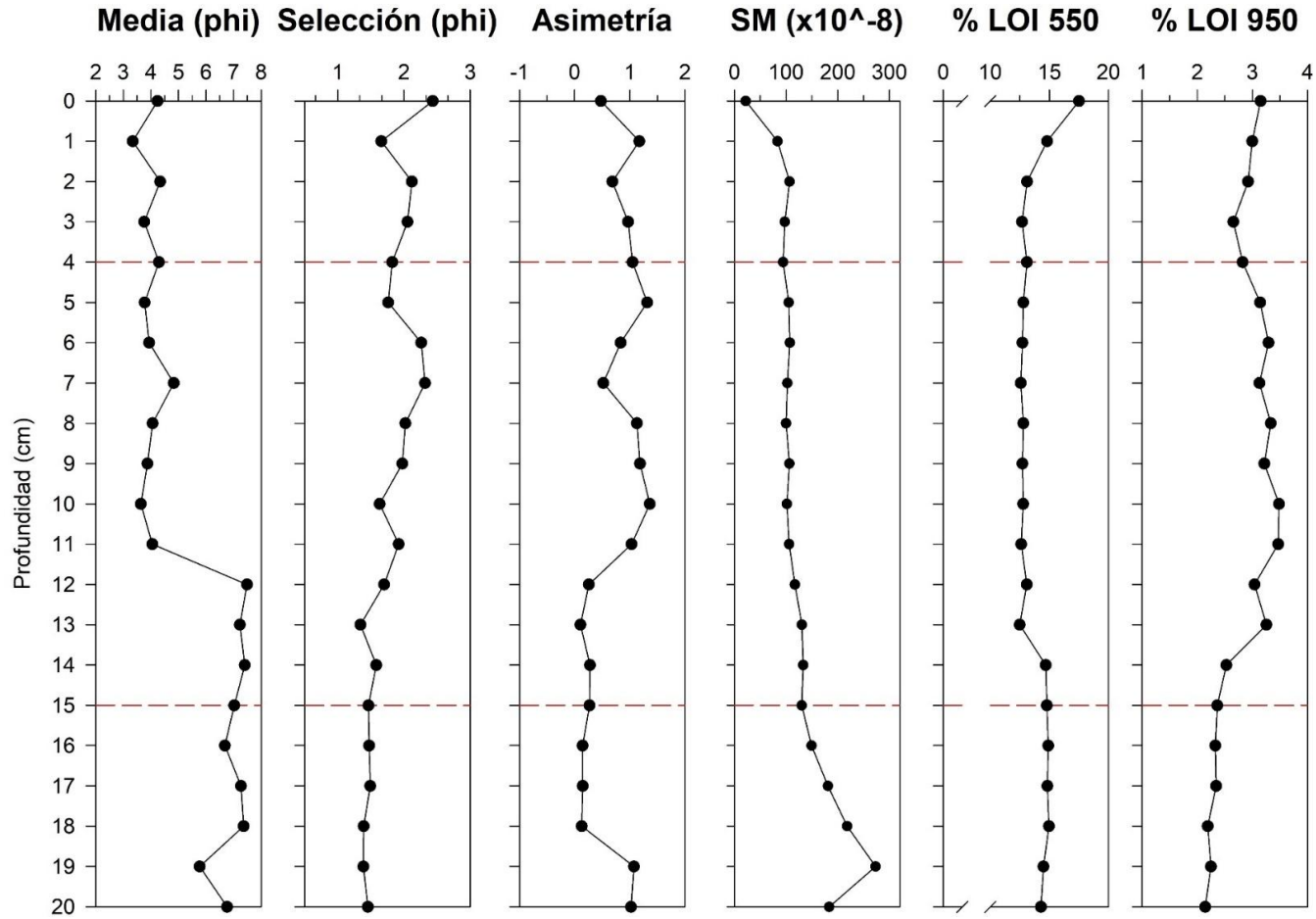


Figura N°22: Perfil estratigráfico de parámetros sedimentológicos Embalse Huelehueico (2024).



3.3 Análisis Polínicos

En las muestras de sedimento que fueron analizadas, se identificó específicamente el taxa polínico del *Pinus* (<40µm y >40µm), y para su análisis se realizó un conteo de los granos de polen a lo largo del sedimento.

3.3.1 Concentración de Polen de Pino

El polen de pino con respecto a su concentración a lo largo del testigo sedimentario presenta una dinámica moderadamente marcada a lo largo del perfil, comenzamos con 224 granos de polen contados en el cm 1, para luego elevar esta cifra a 400 en el cm 2, lo que puede reflejar un periodo de alto aporte o producción de polen al sistema sedimentario.

Estos valores se mantienen elevados alcanzando incluso los 482 granos en el cm 4, siendo ese el valor mas alto a lo largo de la columna, a partir de este punto los valores no logran superar la barrera de los 300 pero si presentan variaciones, que pueden reflejar posibles fluctuaciones en la capa vegetal de la cuenca, encontrándonos con 159 granos en el cm 5, después una subida llegando a 284 granos en el cm 6 y luego otra bajada con 167 en el cm 7 para volver a subir a 222 en el cm 8.

A medida que aumenta la profundidad las concentraciones comienzan a disminuir constantemente, desde los 150 granos en el cm 9 hasta los 71 en el cm 21, lo que podría indicar una disminución de las plantaciones de pino a lo largo de la cuenca y el territorio cercano.

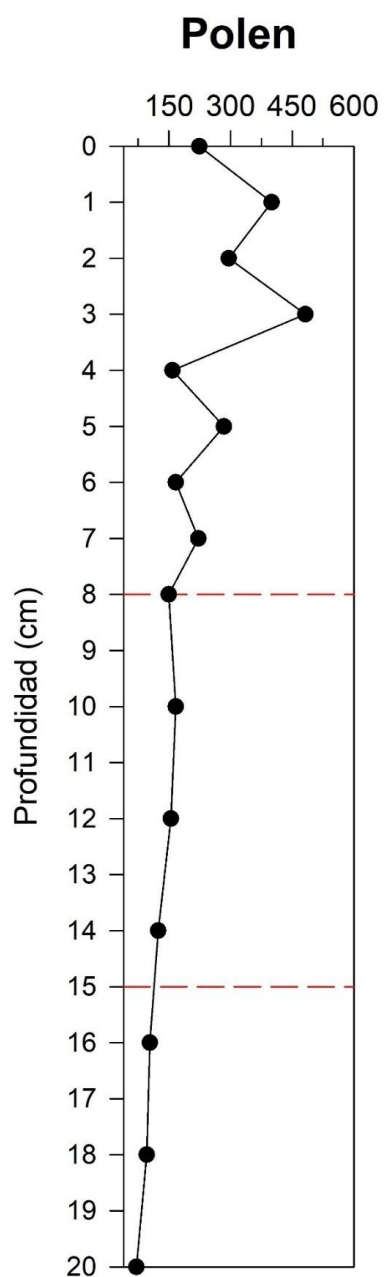


Figura N°23: Conteo de polen *Pinus* en perfil sedimentológico Embalse Huelehueico (2024).

3.4 Perfil de tasa de sedimentación

3.4.1 Tasa de sedimentación g/cm²/año

La tasa de sedimentación en el perfil sedimentario presenta un gran aumento en los centímetros superiores, mientras que en los centímetros inferiores se mantiene constante.

En los centímetros superiores se observa un gran aumento en la tasa de sedimentación, exactamente en el centímetro 3, donde la tasa de sedimentación alcanza un valor de 0,2357 g/cm²/año para luego disminuir y presentar una tasa de sedimentación que varía entre 0,0582 y 0,0757 g/cm²/año, luego en el centímetro 6 se presenta un ligero aumento llegando a 0,0935 g/cm²/año, finalmente los centímetros posteriores tienden a disminuir con un valor mínimo de 0,0396 g/cm²/año.

Tasa Sedimentación g/cm²/año

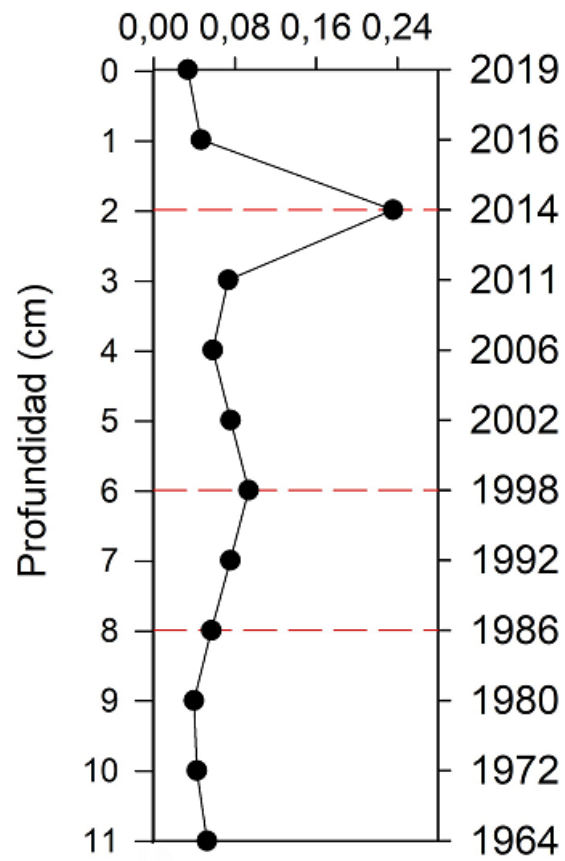


Figura N°24: Perfil de tasa de sedimentación Embalse Huelehueico (2024).

5 Discusión

Dado los resultados que entrego esta investigación se pudo determinar cambios en las tasas de sedimentación del embalse y su relación con los parámetros granulométricos, como también con el contenido de materia orgánica (LOI 550), carbonatos (LOI 950), susceptibilidad magnética (SM) y el conteo de granos de polen de pino.

Es importante señalar la relación entre el análisis de los granos de polen de pino y la tasa de sedimentación obtenida en el embalse, ya que el conteo de polen de pino presenta un aumento significativo desde el centímetro 14, lo que nos podría sugerir la llegada de plantaciones forestales al área cercana al embalse, pero después a partir del centímetro 8, el incremento es aún mayor, lo que coincide con la compra del fundo las nieves por parte de CMPC en 1985 y la posterior plantación de especies forestales exóticas.

En cuanto al embalse Huelehueico, es relevante destacar que, según la entrevista que se le realizó a don Raimundo Calvo, dueño del embalse, desde aproximadamente el año 2000, CMPC ha priorizado la plantación de eucalipto en la zona.

En cuanto a las tasas de sedimentación observadas en el gráfico, se puede observar un peak en el año 2014, centímetro 2 respectivamente, lo que podría ser un indicador de un evento erosivo de gran magnitud en la cuenca, probablemente asociado a la cosecha del bosque, ya que CMPC realiza esta mediante métodos altamente invasivos como son la tala rasa, lo cual deja a los terrenos altamente susceptibles a la erosión hídrica y por ende al aumento en la tasa de sedimentación, en relación a esta punto, se evidencia un incremento en la tasa de sedimentación en 1998, lo que podría sugerir una cosecha previa. Considerando que el eucalipto se cosecha aproximadamente cada 13 años, el intervalo de

16 años entre los peaks de sedimentación de 1998 y 2014 podría coincidir con un ciclo de cosecha del eucalipto.

Tabla N° 5: Cosecha CMPC. Fuente: (Bastidas, R 2021).

Espece	Cosecha (años)
<i>Pinus radiata</i>	18/23
<i>Eucalyptus nitens</i>	13

Esta hipótesis se podría reforzar con las imágenes satelitales obtenidas en los años 2010 y 2015 respectivamente.

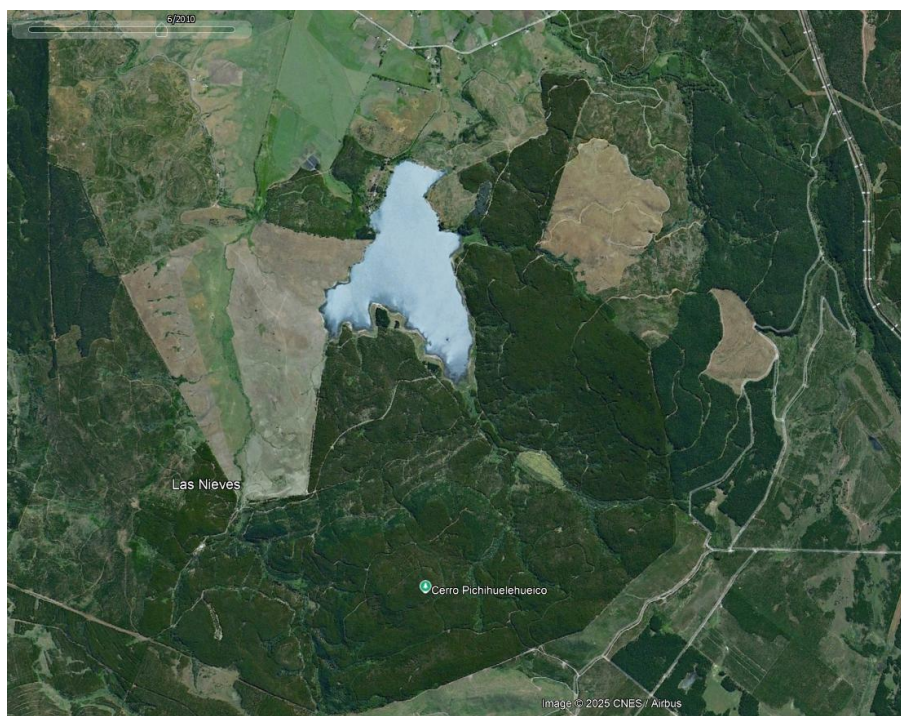


Figura 25: Imagen satelital (2010) Fuente: Google Earth Pro.

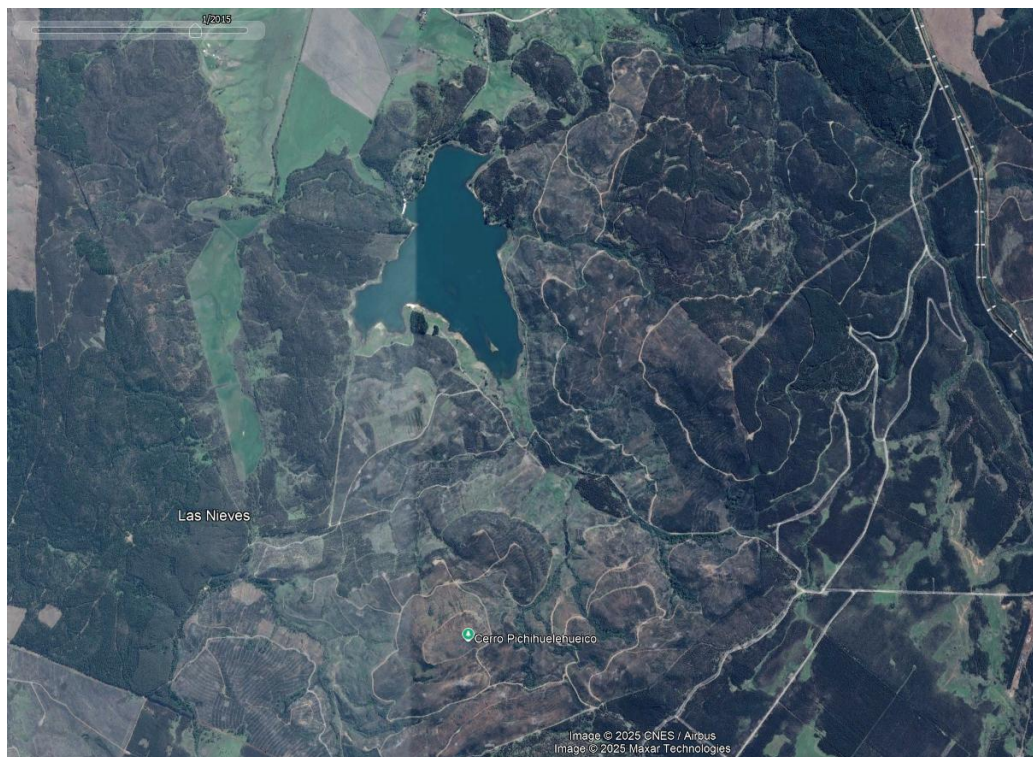


Figura 26: Imagen satelital (2015). Fuente: Google Earth Pro.

Como se observa en las imágenes, en el año 2010 la cuenca presentaba bosques bien formados y con copas de gran tamaño, mientras que en el año 2015 se pueden observar zonas despejadas y bosques en etapa temprana de crecimiento.

6 Conclusión

La presión generada por la llegada de la silvicultura industrial a la cuenca cambió los patrones de sedimentación, alteró las concentraciones orgánicas y el tamaño de grano en los sedimentos del lago. Con base en el análisis histórico y las fotografías aéreas, se infiere que los periodos de cosechas de plantaciones tendrían un efecto importante en el aumento de la tasa de sedimentación.

Se observó que las plantaciones forestales disminuyen la sedimentación en los periodos de crecimiento, debido a que reducen la exposición del suelo, también las plantaciones forestales, habrían mejorado la productividad de los suelos de la cuenca del embalse ya que antes estos se encontraban descampados

Respecto de mi pregunta de investigación nuestros resultados sugieren que, de forma general, la tasa de sedimentación ha aumentado a lo largo de 60 años. Con dos eventos asociados, probablemente, al proceso de cosecha.

Se recomienda seguir la normativa de CONAF de conservar una franja de bosque de protección, tanto en el embalse como en sus tributarios.

7 Referencias

- AGRARIA. (2005). Evaluación de Impacto. Programa bonificación forestal DL 701. Ministerio de Agricultura. CONAF.
- Alaniz, A., Abarzúa, A., et al. (2021). Linking sedimentological and spatial analysis to assess the impact of the forestry industry on soil loss: The case of Lanalhue Basin, Chile. *Catena*, 207, 105660. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105660>
- Amaya Donoso, R. J. E. (2019). Análisis de la distribución espacio-temporal de la temperatura en las aguas superficiales de la Región de La Araucanía [Tesis de Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío]. Repositorio institucional.
- Armesto, J., Manushevich, D., et al. (2010). From the Holocene to the Anthropocene: a historical framework for land cover change in southwestern South America in the past 15,000 years. *Land Use Policy*, 27(2), 148-160.
- Astaburuaga y Cienfuegos., (1899). Diccionario geográfico de la República de Chile. Biblioteca Nacional Digital de Chile. <http://www.bibliotecanacionaldigital.gob.cl/bnodd/ir-a-ficha?id=200243746>
- Ayala, L., Niño, Y., et al. (1989). Mecánica de la erosión por flujo superficial. Centro de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile.
- Azcune, G., Perez Parada, A., et al. (2020). Implementación de la datación mediante ^{210}Pb - ^{137}Cs en Uruguay para el reconocimiento de la variabilidad climático-ambiental del Holoceno superior. Caso de estudio: Laguna de las Nutrias - Rocha - Uruguay. *INNOTECH*, (20), 89–105.
- Bienes-Allas, R. (2006). La erosión hídrica: Importancia y clases. Parámetros climáticos condicionantes de la erosión (intensidad, torrencialidad, aridez, déficit hídrico, tamaño gota) (Vol. 1, Núm. 2). Bienes y Marqués.
- Camus, P. (2006). Ambiente, bosques y gestión forestal en Chile. Dibam-Lom.
- Camus, P., Castro, S., et al. (2014). Historia y política de la gestión forestal en Chile a la luz del pino insigne (*Pinus radiata*). En F. M. Jaksic & S. A. Castro (Eds.), *Invasiones biológicas en Chile: Causas globales e impactos locales* (pp. [páginas]). Ediciones Universidad Católica de Chile.
- Carrasco, J. J., García-Huidobro P. de A., J., et al. (2010). El suelo y su relacion con el manejo (Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias No. 207). Instituto de Investigaciones Agropecuarias. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/7337>
- Castro Aguilera, P. (2018). La erosión en Chile: una mirada histórica y geográfica para entender el proceso de la expansión forestal en las comunas de Constitución, Empedrado y Chanco. Región del Maule [Tesis de licenciatura, Universidad de Chile]. Repositorio institucional.
- Centro de Análisis y Políticas Públicas. (2013). *Estado del Medio Ambiente en Chile 2012*. Universidad de Chile.

- CIREN, Centro de Información de Recursos Naturales. (2010b). Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile. Región del Biobío (Núm. 1). Ministerio de Agricultura.
- Cisternas, M. (1999). Evidencias sedimentarias de intervención antrópica en los suelos de una pequeña cuenca lacustre durante los últimos 50 años (San Pedro de la Paz, VIII región, Chile) [Tesis doctoral, Universidad de Concepción].
- Clemens, G., Fiedler, S., et al. (2010). Soil Fertility Affected by Land Use History, Relief Position and Parent Material Under a Tropical Climate in NW-Vietnam. *Catena*, 81, 87-96.
- CONAF-INFOR. (2004). Exportaciones forestales chilenas.
- Dearing, J. A. (1991). Lake sediment records of erosional processes. *Hydrobiologia*, 214, 99–106.
- Den Biggelaar, C., Lal, R., et al. (2004). The global impact of soil erosion on productivity. 1: Absolute and relative erosion-induced yield losses. *Advances in Agronomy*, 81, 1-48.
- Díaz, E., López, D., et al. (2007). Los derechos laborales del tratado de libre comercio Chile-Estados Unidos en la Industria forestal y en la industria del salmón (Cuaderno de Investigación N°32). División de Estudios, Dirección del Trabajo.
- Elizalde Mac-Clure, R. (1970). La sobrevivencia de Chile. La conservación de sus recursos naturales renovables (2a ed.). Ministerio de Agricultura.
- Endlicher, W. (1988). El problema de la erosión del suelo en la cordillera de la Costa de la Octava Región. *Revista de Geografía Norte Grande*, 98(15), 11-27.
- Escalona Ulloa, M., & Olea, J. (2022). Colonialismo y despojo en Wallmapu, sur de Chile: expansión territorial y capitalismo en la segunda mitad del siglo XIX. *Tempo (Brazil)*, 28, 239-259. <https://doi.org/10.1590/TEM-1980-542X2022v2801013>
- Espinoza, E. (1897). *Jeografía descriptiva de la República de Chile*. Imprenta i Encuadernación Barcelona.
- FAO. (1984). Erosion and soil productivity: a review (Consultants Working Paper N°1, Soil Conservation Programme). Food and Agriculture Organization.
- FAO. (1996). Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes (Forestry Paper No. 149). Food and Agriculture Organization.
- FAO. (2009). Erosión de suelos en América Latina. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Flores Cota, E. (2009). Efecto de las plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus* L.) sobre los suelos de comunidades asentadas en la red ferroviaria Cochabamba-Cliza. *Acta Nova*, 4(2-3), 338-355.
- Flower, R. J., Stevenson, A., et al. (1988). Catchment disturbance inferred from studies of three contrasted sub-humid environments in Morocco. *Journal of Paleolimnology*, 1, 293-322.

- Frey, D. (1988). What is paleolimnology? *Journal of Paleolimnology*, 1, 5-8.
- García, Y., Ramírez, W., et al. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125-138.
- García-Chevesich, P. (2008). *Procesos y Control de la Erosión*. Outskirts Press Inc.
- GEIB. (2006). TOP 20: Las 20 especies exóticas invasoras más dañinas presentes en España (Serie Técnica No. 2). GEIB.
- González Irineo, R. E. (2013). Evaluación de la calidad del suelo para diferentes usos y cubiertas vegetales en la ladera Este de Cerro Grande, comunidad Dexcani Alto, municipio de Jilotepec [Tesis de... - Tipo de tesis desconocido]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Guevara, T. (1902). Historia de la civilización de Araucanía: los araucanos y la República. Imprenta Cervantes.
- Hernández, O., & Flores, J. (2023). Granulometría: Propiedades de los sedimentos y su análisis práctico. Universidad Autónoma del Carmen.
- Klubock, T. M. (2014). La frontera: forests and ecological conflict in Chile's frontier territory. Duke University Press.
- Mansoulet, J. (1898). Guía-crónica de la frontera araucana de Chile, años 1892-93. Imprenta Barcelona.
- Manuschevich, D. (2020). Land use as a socio-ecological system: developing a transdisciplinary approach to studies of land use change in south-central Chile. En F. Fuders & P. Donoso (Eds.), *Ecological economic and socio ecological strategies for forest conservation* (pp. 79-98). Springer.
- Menadier, J. (2012). La agricultura y el progreso de Chile (1869-1886). CCHC-PUC-DIBAM.
- Monckeberg, M. (2001). El Saqueo de los Grupos Económicos al Estado.
- Morales, J. (1989). El desarrollo forestal en Concepción. Grupo de Estudio Agro-Regionales GEA y Universidad Academia de Humanismo Cristiano.
- Oldeman, L. R., Hakkeling, R. T. A., et al. (1991). World map of the status of human-induced soil degradation. ISRIC.
- Otero, L. (2006). La huella del fuego. Pehuén.
- Ovalle Castillo, F. J. (1912). Por el sur de Chile: civilización desconocida. La Ilustración.
- 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 doctoral, Universidad de Concepción].
- Perret, S., Wrann, J., et al. (2000). Aplicación de técnicas de captación de aguas lluvia en predios de secano para forestación (Manual 25). INFOR.
- Pérez, J. (1992). Estudio de la estabilidad estructural del suelo en relación con el complejo de cambio (comportamiento de algunos suelos característicos españoles). Universidad Politécnica de Madrid.
- Pizarro, R., Sanguesa, C., et al. (2003). Manual de conservación de aguas y suelos. Instructivo No 1 Zanjás de Infiltración.

- Pizarro, R., García-Chevesich, P., et al. (2023). Establishment of Monterrey Pine (*Pinus radiata*) Plantations and Their Effects on Seasonal Sediment Yield in Central Chile. *Sustainability*, 15(7), 6052.
- Rivera, F., Gutiérrez, A., et al. La medición de sedimentos en México. IMTA, UJAT y UNESCO. 2006.
- Ruiz-Sinoga, J., Díaz, A., et al. (2013). Erosión y degradación de los suelos en el mundo, Mexico y España. [Fuente desconocida].
- Salcedo, R. (2007). Análisis de la erosividad de la lluvia en Isla de Margarita (Venezuela) a través de datos de precipitación horaria. *Investigaciones Geográficas*, 44, e09. <https://doi.org/10.14198/INGEO2007.44.09>
- Wohlfarth, B., & Björck, Å. (2001). Varv på varv på varv. En *Naturvetenskapliga forskningsrådets årsbok 2001* (pp. 113–125). Science Press.
- Yoshikawa, S., & Nemoto, K. (2010). Seasonal variations of sediment transport to a canyon and coastal erosion along the Shimizu coast, Suruga Bay, Japan. *Marine Geology*, 271, 165-176.