



Universidad de Concepción

Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo

# MANUAL DE EVALUACIÓN Y RESTAURACIÓN AGRO-ECOLÓGICA DE SUELOS DE USO AGROPECUARIOS AFECTADOS POR INCENDIOS

2020



Ciencia, Tecnología  
e Innovación  
en Bioeconomía



Facultad  
de Agronomía



Agencia  
Nacional de  
Investigación  
y Desarrollo

Ministerio de Ciencia,  
Tecnología, Conocimiento  
e Innovación

Gobierno de Chile



Este texto fue elaborado en el marco del proyecto de la Agencia Nacional de Innovación y Desarrollo (ANID) código ARII170003 “*Desarrollo de un manual de evaluación y restauración agro- ecológica de suelos de uso agropecuarios afectados por incendios*”, el cual fue financiado a través de la Convocatoria de Capital Social del Programa Regional 2017 – Región del Biobío, mediante el Instrumento de Acción Regional para el Desarrollo Territorial, Proyectos de I+D colaborativa con pymes.

Equipo redactor:

**Marco Sandoval Estrada**

Ingeniero Agrónomo, Dr. en Ciencias Ambientales  
Departamento de suelos, Facultad de Agronomía  
Universidad de Concepción, Chile

**Carla Pérez Quilodrán**

Ingeniero Civil Químico, Diplomado Ingeniería Ambiental  
Unidad de Desarrollo Tecnológico  
Universidad de Concepción, Chile

**José Manuel Recio Espejo**

Dr. en Ciencias Biológicas  
Facultad de Ciencias, Campus Universitario de Rabanales  
Universidad de Córdoba, España

**Juan Carlos Sánchez Hernández**

Ph.D. in Environmental Sciences  
Facultad de Ciencias Ambientales y Bioquímica  
Universidad de Castilla - La Mancha, España

**Alejandra Pérez Loyola**

Ingeniero Civil Químico, Diplomado Ingeniería Ambiental  
Unidad de Desarrollo Tecnológico  
Universidad de Concepción, Chile

**Juan Capulín Grande**

Ingeniero Agrónomo, Dr. en Ciencias  
Instituto de Ciencias Agropecuarias  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

**Cita bibliográfica:**

Sandoval E., M., C. Pérez Q., J. Recio., J. Sánchez-  
Hernández., J. Capulín., A. Pérez. 2020. Desarrollo de un  
manual de evaluación y restauración agro-ecológica de  
suelos de uso agropecuarios afectados por incendios.  
Proyecto ARII170003. Agencia Nacional de Investigación y  
Desarrollo (ANID). 80 p.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b>	<b>4</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>6</b>
<b>ABREVIATURAS</b>	<b>7</b>
<b>PREFACIO</b>	<b>8</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
<b>2. TOMA DE MUESTRAS DE SUELOS AFECTADOS POR EL FUEGO</b>	<b>13</b>
2.1. Objetivo	13
2.2. Procedimiento toma de muestra	13
2.3. Equipos y materiales especiales	16
2.4. Resumen de indicaciones para el diagnóstico	16
2.5. Bibliografía	17
<b>3. INDICADORES DE CALIDAD QUÍMICA DEL SUELO</b>	<b>19</b>
3.1. Índice de Calidad Química de Suelos (ICQS)	19
3.2. Análisis de las muestras	19
3.3. Cálculo del Índice de Calidad Química del Suelo (ICQS)	19
3.4. Niveles de Referencia (NR) e Índice de Calidad Química del Suelo (ICQS)	21
3.5. Bibliografía	27
<b>4. INDICADORES DE CALIDAD FÍSICA DEL SUELO</b>	<b>29</b>
4.1. Índice de Calidad Física de Suelos (ICFS)	29
4.2. Análisis de las muestras	29
4.3. Cálculo del Índice de Calidad Física del Suelo (ICFS)	30
4.4. Niveles de Referencia (NR) e Índice de Calidad Física del Suelo (ICFS)	31
4.5. Bibliografía	36
<b>5. INDICADORES DE CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL SUELO</b>	<b>39</b>
5.1. Calidad Microbiológica de los Suelos	39
5.2. Análisis de la actividad microbiana del suelo	39
<b>6. ANEXOS</b>	<b>43</b>
6.1. Caso de Estudio N°1 – Viñedo Cordillera de la Costa	43
6.2. Caso de Estudio N°2 – Cultivo Tradicional Depresión Intermedia	51
6.3. Caso de Estudio N°3 – Cultivo Tradicional Precordillera	58
6.4. Caso de Estudio N°4 – Calidad Microbiológica (Respiración microbiana y Actividad enzimática) de suelos afectados por incendios	65
6.5. Caracterización compost utilizado en ensayos	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ejemplo de obtención de muestra compuesta a partir de “x” submuestras	14
<b>Figura 2.</b> Ejemplo de toma de “x” muestras a distintas profundidades	15
<b>Figura 3.</b> Diagrama de flujo toma de muestras y diagnóstico	16
<b>Figura 4.</b> Resumen de Cuadros donde se encuentran los ICQS	20
<b>Figura 5.</b> Diagrama de decisiones para restauración calidad química de los suelos	26
<b>Figura 6.</b> Resumen de Cuadros donde se encuentran los ICFS	30
<b>Figura 7.</b> Diagrama de decisiones para restauración calidad física de los suelos	36
<b>Figura 8.</b> Opciones de análisis sugeridos para evaluar la calidad microbiológica de un suelo	40
<b>Figura 9.</b> Opciones de medidas de restauración microbiológicas	41
<b>Figura 10.</b> Caso de Estudio N°1	43
<b>Figura 11.</b> Caso de Estudio N°2	51
<b>Figura 12.</b> Caso de Estudio N°3	58
<b>Figura 13.</b> Respiración microbiana del suelo en las tres condiciones fisiográficas del centro-sur de Chile afectadas por incendio	67
<b>Figura 14.</b> Porcentaje de materia orgánica en tres condiciones fisiográficas del centro-sur de Chile afectadas por incendio	68
<b>Figura 15.</b> Análisis de actividad microbiológica en función de ciclos de elementos y enzimas	70
<b>Figura 16.</b> Variación de las actividades enzimáticas en suelos quemados de las localidades de Florida (secano interior), el Valle Central (Depresión intermedia) y Precordillera Andina	72
<b>Figura 17.</b> Variación de las actividades enzimáticas relacionadas con el ciclo del nitrógeno en suelos quemados de las localidades de Florida (Cordillera de la costa o Secano interior), el Valle central (Depresión intermedia) y Precordillera Andina	73
<b>Figura 18.</b> Variación de las actividades enzimáticas en el perfil de los suelos quemados y suelos de referencia en la localidad de Florida (Cordillera de la Costa o Secano interior)	74
<b>Figura 19.</b> Variación de las actividades enzimáticas en el perfil de los suelos quemados y suelos de referencia en el Valle Central	75
<b>Figura 20.</b> Variación de las actividades enzimáticas en el perfil de los suelos de Precordillera Andina	77

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Niveles de referencia de Materia Orgánica para suelos minerales y su índice de calidad química del suelo	21
<b>Cuadro 2.</b> Niveles de referencia de Materia Orgánica para suelos derivados de cenizas volcánicas y su índice de calidad química del suelo	22
<b>Cuadro 3.</b> Niveles de referencia de pH para suelos minerales y su índice de calidad química del suelo	22
<b>Cuadro 4.</b> Niveles de referencia de Nitrógeno disponible para suelos minerales y su índice de calidad química del suelo	23
<b>Cuadro 5.</b> Niveles de referencia de Fósforo (o fosfato, $PO_4^{2-}$ ) disponible para suelos minerales y su índice de calidad química del suelo	23
<b>Cuadro 6.</b> Niveles de referencia de Potasio para suelos minerales y su índice de calidad química del suelo	23
<b>Cuadro 7.</b> Niveles de referencia de Calcio para suelos minerales y su índice de calidad química del suelo	24
<b>Cuadro 8.</b> Niveles de referencia de Magnesio para suelos minerales y su índice de calidad química del suelo	24
<b>Cuadro 9.</b> Niveles de referencia de Sodio para suelos minerales y su índice de calidad química del suelo	25
<b>Cuadro 10.</b> Ejemplo de parámetros evaluados e Índice de Calidad Química de Suelo Total (ICQS total)	25
<b>Cuadro 11.</b> Índice de Calidad Química Total del Suelo, interpretación según su nivel y recomendación general	26
<b>Cuadro 12.</b> Niveles de referencia de Materia Orgánica para suelos minerales y su índice de calidad física del suelo	31
<b>Cuadro 13.</b> Niveles de referencia de Materia Orgánica para suelos derivados de cenizas volcánicas y su índice de calidad física del suelo	32
<b>Cuadro 14.</b> Niveles de referencia e índice de calidad física de suelos para Densidad aparente y Porosidad total para suelos de mineralogía cristalina (1:1,1:2)	32
<b>Cuadro 15.</b> Niveles de referencia e índice de calidad física de suelos para Densidad aparente y Porosidad total para suelos derivados de cenizas volcánicas	32
<b>Cuadro 16.</b> Niveles de referencia de Macroagregados para suelos minerales y su índice de calidad física del suelo	33
<b>Cuadro 17.</b> Niveles de referencia de Microagregados para suelos minerales y su índice de calidad física del suelo	33
<b>Cuadro 18.</b> Niveles de referencia de Diámetro Peso Medio ponderado para suelos minerales y su índice de calidad física del suelo	33
<b>Cuadro 19.</b> Niveles de referencia de Altura de Agua Aprovechable para suelos minerales y su índice de calidad física del suelo	34

<b>Cuadro 20.</b> Niveles de referencia de Conductividad hidráulica saturada (movimiento de agua en el perfil del suelo) para suelos minerales y su índice de calidad física del suelo	34
<b>Cuadro 21.</b> Ejemplo de parámetros evaluados e Índice de Calidad Física de Suelo Total (ICFS total).	35
<b>Cuadro 22.</b> Índice de Calidad Física Total del Suelo, interpretación según su nivel y recomendación general	35
<b>Cuadro 23.</b> Estimación de ICQS en viñedo no quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 3.4	44
<b>Cuadro 24.</b> Estimación de ICQS en viñedo quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 3.4	44
<b>Cuadro 25.</b> Estimación de ICFS en viñedo no quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 4.4	45
<b>Cuadro 26.</b> Estimación de ICFS en viñedo quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 4.4	46
<b>Cuadro 27.</b> Estimación de ICQS en viñedo quemado (muestras 0-20 cm) post restauración (compost y cincelado) según NR definidos en la sección 3.4	47
<b>Cuadro 28.</b> Comparación de ICQS en viñedo quemado (muestras 0-20 cm) restaurado según NR definidos en la sección 3.4	48
<b>Cuadro 29.</b> Estimación de ICFS en viñedo quemado (muestras 0-20 cm) post restauración (compost y cincelado) según NR definidos en la sección 4.4	49
<b>Cuadro 30.</b> Comparación de ICFS en viñedo quemado (muestras 0-20 cm) restaurado según NR definidos en la sección 4.4	50
<b>Cuadro 31.</b> Estimación de ICQS para el caso de cultivo tradicional no quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 3.4	52
<b>Cuadro 32.</b> Estimación de ICQS para el caso de cultivo tradicional quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 3.4	52
<b>Cuadro 33.</b> Estimación de ICFS para el caso de cultivo tradicional no quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 4.4	53
<b>Cuadro 34.</b> Estimación de ICFS para el caso de cultivo tradicional quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 4.4	54
<b>Cuadro 35.</b> Comparación de ICQS en cultivo tradicional (muestras 0-20 cm) restaurado según NR definidos en la sección 3.4	56
<b>Cuadro 36.</b> Comparación de ICFS en cultivo tradicional (muestras 0-20 cm) restaurado según NR definidos en la sección 4.4	57
<b>Cuadro 37.</b> Estimación de ICQS para el caso de cultivo tradicional no quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 3.4	59
<b>Cuadro 38.</b> Estimación de ICQS para el caso de cultivo tradicional quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 3.4	59

<b>Cuadro 39.</b> Estimación de ICFS para el caso de cultivo tradicional no quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 4.4	60
<b>Cuadro 40.</b> Estimación de ICFS para el caso de cultivo tradicional quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 4.4	61
<b>Cuadro 41.</b> Comparación de ICQS en cultivo tradicional (muestras 0-20 cm) restaurado según NR definidos en la sección 3.4	63
<b>Cuadro 42.</b> Comparación de ICFS en cultivo tradicional (muestras 0-20 cm) restaurado según NR definidos en la sección 4.4	64
<b>Cuadro 43.</b> Valores de tasa de respiración y respiración acumulada medidos para los suelos de los tres sectores fisiográficos	66
<b>Cuadro 44.</b> Datos generales de sitios de muestreo	70

## GLOSARIO

<b>Alfisol</b>	Orden de suelo según taxonomía de suelo (USDA).
<b>Altura de Agua Aprovechable</b>	Es el contenido de agua disponible para las plantas expresado en cm.
<b>Andisol</b>	Orden de suelo según taxonomía de suelos (USDA).
<b>Capacidad de Campo</b>	Contenido de agua en una muestra de suelo sometida a una presión de 0,33 atmósferas alcanzado el equilibrio.
<b>Macroagregado</b>	Agregados de tamaño igual o menores a 2,0 mm y mayores de 0,25 mm.
<b>Microagregado</b>	Agregados de tamaño igual o inferior a 0,25 mm.
<b>Profundidad efectiva</b>	Profundidad a la cual pueden penetrar las raíces en el suelo sin mayores obstáculos que impidan conseguir el agua y los nutrientes indispensables para su desarrollo.
<b>Punto de Marchitez Permanente</b>	Contenido de agua en una muestra de suelo sometida a una presión de 15 atmósferas alcanzado el equilibrio.

## ABREVIATURAS

<b>Al</b>	Aluminio
<b>Al<sup>+3</sup></b>	Ión Aluminio
<b>AWP</b>	Altura de Agua Aprovechable
<b>B</b>	Boro
<b>BO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	Ión Borato
<b>C</b>	Carbono
<b>C/N</b>	Relación carbono nitrógeno
<b>Ca</b>	Calcio
<b>Ca<sup>+2</sup></b>	Ión calcio
<b>CC</b>	Capacidad de Campo
<b>cm</b>	Centímetro
<b>cmol</b>	Centimol
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>Da</b>	Densidad Aparente
<b>DPM</b>	Diámetro Peso Medio
<b>ha</b>	Hectárea
<b>ICFS</b>	Índice de Calidad Física del Suelo
<b>ICFS tm</b>	Índice de Calidad Física del Suelo máximo
<b>ICQS</b>	Índice de Calidad Química del Suelo
<b>ICQS tm</b>	Índice de Calidad Química del Suelo máximo
<b>K</b>	Potasio
<b>K<sup>+</sup></b>	Ión potasio
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>K<sub>s</sub></b>	Conductividad Hidráulica Saturada
<b>MAC</b>	Macroagregado
<b>Mg</b>	Magnesio
<b>Mg<sup>+2</sup></b>	Ión magnesio
<b>mg</b>	Miligramo
<b>MIC</b>	Microagregado
<b>Mn</b>	Manganeso
<b>Mn<sup>+3</sup></b>	Ión Manganeso
<b>MO</b>	Materia orgánica
<b>Na</b>	Sodio
<b>Na<sup>+</sup></b>	Ión sodio
<b>N</b>	Nitrógeno
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	Nitrato o Ión nitrato
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	Nitrito o Ión nitrito
<b>NR</b>	Niveles de Referencia
<b>P</b>	Fósforo
<b>PO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b>	Ión fosfato
<b>PE</b>	Profundidad efectiva
<b>pH</b>	Potencial de Hidrógeno
<b>PMP</b>	Punto de Marchitez Permanente
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>Pt</b>	Porosidad Total
<b>µg</b>	Microgramo
<b>Zn</b>	Zinc
<b>Zn<sup>+2</sup></b>	Ión zinc

## PREFACIO

En los últimos años se ha tornado recurrente hablar de mega incendios, pues debido a su gran magnitud territorial han afectado plantaciones forestales, bosques nativos, matorrales, tierras agrícolas y asentamientos humanos. Su origen es atribuido principalmente a la actividad humana y al clima (González y Veblen, 2007). Se cree que hay un aumento en la ocurrencia de incendios, debido a que cada vez se dan o conjugan con mayor frecuencia las condiciones que los favorecen, acentuadas por el cambio climático (Pausas y Keleey, 2014 y Swayer *et al.*, 2018).

Por otro lado, dentro de las actividades agrícolas y forestales, el uso de fuego es tradicional a través de la quema, práctica frecuentemente usada en la reducción de residuos de las cosechas (Girona-García *et al.*, 2016 y Armas-Herrera *et al.*, 2016), sin embargo, la modalidad de quema controlada en muchos casos se ha realizado sin las debidas precauciones, generando incendios de gran intensidad (Santelices y Litton, 1996).

También, esto ha sido el detonante de la erosión de los suelos, que sumado a las malas prácticas agrícolas, ha llevado a una degradación generalizada de este recurso, el cual aporta con funciones, por ejemplo, ambientales, productivas y sociales a los habitantes de un territorio.

De esta condición surge la necesidad de contar con indicadores válidos de calidad de suelo, que permitan establecer el estado del mismo, a nivel químico, físico y microbiológico, según se requiera.

Considerando los antecedentes presentados, el objetivo central de este proyecto es aportar un manual, que establece un protocolo de trabajo para diagnosticar la calidad de un suelo, cuando éste sea afectado por situaciones o estresores que alteren sus condiciones y por ende su desempeño y utilización. Además, incluye un árbol de decisiones que permite proponer alternativas de manejos sustentables, implementando correcciones en estos ecosistemas productivos, de manera de poder mantener su sostenibilidad en el tiempo.

Esta propuesta no se limita al efecto estresor del fuego, dado que puede aplicarse a cualquier impacto o nuevas exigencias productivas o de uso a las que se someta al suelo, y como toda propuesta es susceptible de mejorar en la medida que el conocimiento avanza en el tiempo, teniendo la flexibilidad de ir incorporando cambios.

Finalmente, señalar que este manual está diseñado de manera didáctica, mediante diagramas de flujos que guiarán al usuario en su aplicación. Si bien se requiere un conocimiento básico de agronomía, los equipos técnicos que atienden a miles de agricultores deberían poder utilizar este documento como una herramienta de consulta para potenciar los programas dirigidos a favorecer la agricultura campesina y empresas de mayor tamaño con responsabilidad ambiental.

**Dr. Marco Sandoval Estrada**

masandov@udec.cl

Director Proyecto ARIII70003



# 1

## INTRODUCCIÓN

El presente Manual ha sido estructurado de manera secuencial, Inicia con indicaciones para realizar la toma de muestras, luego proceder a evaluar indicadores de la calidad de los suelos, valores que deberán obtenerse mediante análisis de laboratorio, estableciendo así el estado inicial del suelo (diagnóstico), luego estos valores son comparados con niveles de referencia validados a partir de estudios previos y finalmente se proponen medidas concretas para ayudar a corregir los problemas identificados.

Se establecen indicadores de calidad química, física y microbiológica que permiten visualizar a partir de tablas los niveles de referencia y una interpretación de estos valores en asociación a los indicadores. Se presentan antecedentes para suelos minerales y suelos volcánicos, los cuales son representativos de las regiones de Ñuble y Biobío.

Los indicadores de calidad que se utilizan son:

- Indicadores de calidad química: materia orgánica, pH, concentración de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y sodio
- Indicadores de calidad física: materia orgánica, densidad aparente, porosidad total, macroagregados, microagregados, diámetro peso medio, conductividad hidráulica, altura agua aprovechable
- Indicadores de calidad microbiológica: mineralización de carbono, tasa de respiración de la biomasa microbiana y actividad enzimática

Finalmente se presentan cuatro casos de estudio, donde se ejemplifica la forma de utilizar el Manual. Se muestran los resultados del análisis inicial, las medidas aplicadas para su restauración y el efecto de éstas en los indicadores utilizados, de modo de visualizar el impacto real de las mismas.

Los casos de estudio corresponden a suelos de tipo Alfisol, típicos de la cordillera de la costa o secano interior (cultivo de viñedos) y suelos de tipo Andisol, típicos de la depresión intermedia (Valle central) y de la precordillera andina (ambos con cultivos de trigo).



# 2

## TOMA DE MUESTRAS DE SUELOS AFECTADOS POR EL FUEGO

### 2.1. Objetivo

El objetivo de las tomas de muestras de suelo afectados por el fuego, responde a verificar los cambios que este hecho (o cualquier otro estresor) puede generar en estos y cuyo resultado final es modificar la calidad de suelo (química, física y microbiológica).

### 2.2. Procedimiento toma de muestra

La representación de la muestra debe considerar algunos aspectos mínimos para que a través de ésta se pueda validar los cambios que el fuego pudiera causar al suelo:

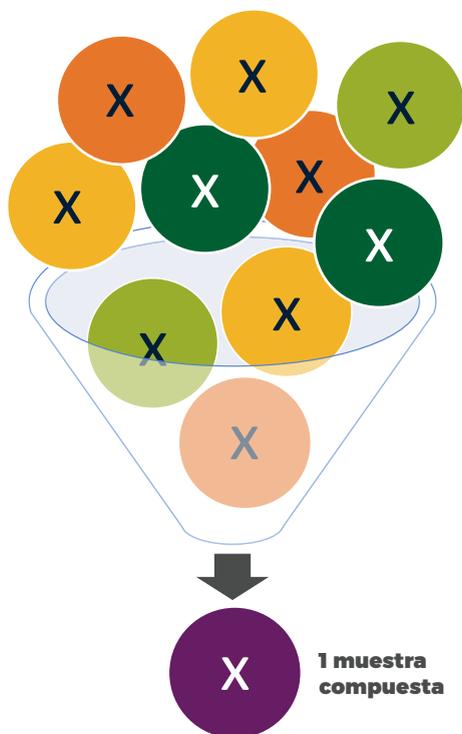
#### 2.2.1 Sitio o área de muestreo

La toma de muestra estará definida por las siguientes condiciones:

- la homogeneidad del tipo de suelo (serie)
- la homogeneidad de la pendiente
- la homogeneidad de la vegetación afectada
- el grado de erosión si lo hubiera

#### 2.2.2 Número de muestras

Para superficies homogéneas se deben tomar un mínimo de tres muestras compuestas por hectárea, esto implica que cada muestra compuesta a su vez está constituida por unas 10 sub muestras, las cuales son homogenizadas (mezcladas), de esta manera se tendrán tres repeticiones que nos darán una idea aproximada de la realidad del sitio, a un costo manejable para la agricultura familiar (Figura 1). Si el presupuesto es muy estrecho, se puede tomar una muestra compuesta por hectárea incrementando las submuestras a 25.



**Figura 1.** Ejemplo de obtención de muestra compuesta a partir de "x" submuestras.

### 2.2.3 Profundidad de muestreo

En general no es necesario tomar la muestra a una profundidad mayor a 20 cm. Si se desea una exploración detallada se recomienda tomar muestras a incrementos de 5 cm. En general, el efecto del fuego no es profundo aunque depende de diversos factores.

5 cm	X	X
10 cm	X	
15 cm		X
20 cm		X

**Figura 2.** Ejemplo de toma de “x” muestras a distintas profundidades.

#### 2.2.4 Cantidad y manejo de la muestra

- **Análisis Químicos:** 500 gramos por muestra compuesta (Sadzawka et al., 2006)
- **Análisis Físicos:** 500 gramos por muestra compuesta (debe considerarse de manera separada cuando la metodología requiere muestras inalteradas). Se puede consultar Sandoval *et al.*, 2012.
- **Análisis Microbiológicos:** 500 gramos y deben ser mantenidos a temperatura constante en lo posible 4°C.

Una vez colectadas las muestras de suelos, se depositan en bolsas de polietileno, en lo posible con cierre hermético. Se debe marcar con un lápiz de tinta resistente al agua, la nomenclatura debe ser simple y permitir identificar fácilmente el sitio, repetición, profundidad y fecha de la muestra.

Los puntos de muestreo deben ser georreferenciados. Si no es posible, se debe realizar un bosquejo del sitio y de los puntos de muestreo indicando medidas generales del sitio y aspectos relevantes que se hayan visualizado.

El traslado al laboratorio debe ser lo más rápido posible en un contenedor de plumavit y/o cooler. Evitar los cambios bruscos de temperatura.

Nota: Este procedimiento es aplicable a todos los tipos de suelos.

## 2.3. Equipos y materiales especiales

- Barreno cilíndrico o pala longitudinal
- Bolsas plásticas con cierre hermético
- Lápiz marcador, libreta de apuntes, lápiz grafito y/o tinta
- Contenedor tipo cooler
- GPS, imágenes
- Huincha métrica

## 2.4. Resumen de indicaciones para el diagnóstico



**Figura 3.** Diagrama de flujo toma de muestras y diagnóstico.

## 2.5. Bibliografía

- ISO 11464. 1994. Soil quality. Pretreatment of samples for physico-chemical analyses. International Organization for Standardization, Genève, Switzerland. 9 p.
- Sandoval E. M., J. Dörner., O. Seguel S., J. Cuevas B., y D. Rivera S. 2012. Métodos de análisis físicos de suelo. Universidad de Concepción. Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Chillán, número 5, 80 p. I.S.B.N. 956-227-293.
- Sadzawka R., A, M.A. Carrasco R., R. Grez Z., M.L. Mora G., H. Flores P. y A. Neaman. 2006. Métodos de análisis de suelos recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas INIA No 34, Santiago, Chile, 164 p.



# 3

## INDICADORES DE CALIDAD QUÍMICA DEL SUELO

### 3.1. Índice de Calidad Química de Suelos (ICQS)

Para evaluar el estado de la calidad de los suelos afectados por el fuego, se utilizará como base el modelo de indicador de calidad de suelos (ICS) desarrollado por Amacher *et al.* (2007), adaptándolo a la realidad nacional (pequeña y mediana agricultura) para lo cual se utilizarán 8 parámetros químicos (pH, MO, N disponible,  $PO_4^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $Na^+$ ) con sus respectivos valores umbrales, interpretación e índice asociado (Cuadros 1 a 9). El criterio de selección de estos indicadores se basa en la frecuencia de los problemas de deficiencias y desequilibrios que se dan en los suelos, cuyas propuestas de remediación son aplicaciones de enmiendas y fertilizantes químicos y orgánicos de frecuente uso en la agricultura.

Cuando fue necesario, los valores aquí tratados se ajustaron para suelos volcánicos (cenizas volcánicas), utilizando antecedentes de la literatura, dado que la propuesta presentada por Amacher *et al.* (2007) entrega rangos de referencias muy amplios para ciertos parámetros (MO, N,  $PO_4^{2-}$  y  $Na^+$ ), razón por la cual fueron modificados de acuerdo a Alcántar *et al.* (1992).

### 3.2. Análisis de las muestras

Los análisis tienen como base la fracción fina del suelo (< 2 mm). Las muestras de suelo son secadas a temperatura ambiente, hasta masa constante. El pH, materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), y sodio (Na) se determinan mediante las técnicas analíticas propuestas por Sadzawka *et al.* (2006).

### 3.3. Cálculo del Índice de Calidad Química del Suelo (ICQS)

A partir de los análisis de laboratorio reportados para los diferentes parámetros químicos seleccionados, se procede a comparar estos con los niveles de referencia indicados en los Cuadros 1 al 9, estos a su vez están asociados a un valor de ICQS (ejemplo en Cuadro 10). Se realiza una interpretación

del valor y se obtiene el ICS asociado, el cual finalmente se utilizará para calcular el ICQS total, este será el resultado de la suma de todos los ICS de los parámetros analizados.

**ICQS Total** = suma de los ICQS de los parámetros evaluados según su nivel de referencia

$$\text{ICQS Total} = \text{ICQS (MO)} + \text{ICQS (pH)} + \text{ICQS (N)} + \text{ICQS (P)} + \text{ICQS (K)} + \text{ICQS (Ca)} + \text{ICQS (Mg)} + \text{ICQS (Na)}$$

Los diferentes valores de referencia, interpretación y valor de ICQS se encuentran en los Cuadros 1 a 9 según se indica en la figura para cada parámetro a evaluar:

<b>MO</b> Cuadro 1 Cuadro 2	<b>pH</b> Cuadro 3	<b>N</b> Cuadro 4	<b>P</b> Cuadro 5
<b>K</b> Cuadro 6	<b>Ca</b> Cuadro 7	<b>Mg</b> Cuadro 8	<b>Na</b> Cuadro 9

**Figura 4.** Resumen de Cuadros donde se encuentran los ICQS.

**Ejemplo:** considerando una situación en la cual todos los niveles son óptimos:

$$\text{ICQSTotal} = 3(\text{MO}) + 2(\text{pH}) + 2(\text{N}) + 2(\text{P}) + 2(\text{K}) + 2(\text{Ca}) + 2(\text{Mg}) + 2(\text{Na})$$

$$\text{ICQS Total} = 17 \text{ (ver cuadro 10)}$$

El valor obtenido de ICQS Total se compara (Cuadro 11), obteniendo una interpretación de la calidad química del suelo.

Según el ejemplo anterior ICQS Total = 17, la interpretación (Cuadro 11) de la calidad química del suelo es **ADECUADA** y la recomendación es "mantener el manejo actual, si éste se considera sustentable".

Si el resultado hubiese sido ICQS Total = 12, la calidad del suelo sería **MEDIA**, y la recomendación sería identificar los valores críticos e implementar acciones de remediación.

Si el resultado hubiera sido ICQS Total = 7, la calidad del suelo correspondería a **BAJA**, y la recomendación sería identificar valores críticos y diseñar plan de manejo sustentable.

En ambos casos se deberán establecer medidas para restaurar primero los parámetros que indican una calidad baja y luego las moderadas de manera de ir aumentando los valores mediante aplicaciones de enmiendas y fertilizantes u otras técnicas que favorezcan mayores niveles de manera equilibrada y de acuerdo a los recursos disponibles (Figura 5).

*Nota: El máximo valor del ICQS total según los parámetros medidos es 17, enseguida el ICQS total también puede ser expresado como: % ICQS = (ICQS Total / ICQS tm) x 100, donde ICQS tm = índice de calidad química de suelo máximo.*

### 3.4. Niveles de Referencia (NR) e Índice de Calidad Química del Suelo (ICQS)

A continuación se presentan los niveles de referencia y los valores de ICQS correspondientes. El resultado del análisis reportado por el laboratorio se ubica en el rango de NR y luego se verifica el valor correspondiente al ICQS, Si el valor es negativo, se debe considerar su resta en la fórmula de ICQS Total.

**Cuadro 1.** Niveles de referencia de Materia Orgánica para suelos minerales y su índice de calidad química del suelo.

	NR	Interpretación	ICQS
MO en suelos minerales (%)	≥ 6	Muy alta	3
	3,5 - 5,9	Alto	2
	2,0 - 3,4	Moderado	1
	0,5 - 1,9	Bajo	-1
	< 0,5	Muy bajo	-2

**Cuadro 2.** Niveles de referencia de Materia Orgánica para suelos derivados de cenizas volcánicas y su índice de calidad química del suelo.

	NR	Interpretación	ICQS
<b>MO en suelos volcánicos (%)</b>	≥ 17	<b>Muy alto</b>	3
	11,0 - 16,9	<b>Alto</b>	2
	5,0 - 10,9	<b>Moderado</b>	1
	3,0 - 4,9	<b>Bajo</b>	-1
	< 3,0	<b>Muy bajo</b>	-2

**Cuadro 3.** Niveles de referencia de pH para suelos minerales y su índice de calidad química del suelo.

	NR	Interpretación	ICQS
<b>pH</b>	< 3,0	<b>Severamente ácido.</b> Las plantas casi no pueden crecer en este ambiente.	-3
	3,01 - 4,0	<b>Fuertemente ácido.</b> Sólo las plantas más tolerantes pueden crecer en este rango de pH y solo si los niveles de MO son bastante mayores para mitigar los altos niveles de Al <sup>3+</sup> y otros metales.	-2
	4,01 - 5,5	<b>Moderadamente ácido.</b> El crecimiento de las plantas intolerantes a acidez es afectado dependiendo de los niveles de Al <sup>3+</sup> , Mn <sup>2+</sup> y otros metales.	-1
	5,51 - 6,8	<b>Ligeramente ácido.</b> Óptimo para muchas especies de plantas, especialmente para aquellas más tolerantes a la acidez.	1
	6,81 - 7,2	<b>Cercano al neutro.</b> Óptimo para muchas especies de plantas, excepto para aquellas que prefieren suelos ácidos.	2
	7,21 - 7,5	<b>Ligeramente alcalino.</b> Óptimo para muchas especies de plantas, excepto para aquellas que prefieren suelos ácidos. Posible deficiencia de PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> y algunos metales (por ejemplo, Zn <sup>2+</sup> )	1
	7,51 - 8,5	<b>Moderadamente alcalino.</b> Preferido por plantas adaptadas a este rango de pH. Posible deficiencia de PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> y metales	-1
	> 8,5	<b>Fuertemente alcalino.</b> Preferido por plantas adaptadas a este rango de pH. Posible toxicidad de BO <sub>3</sub> <sup>-</sup> y otros oxianiones.	-2

**Cuadro 4.** Niveles de referencia de Nitrógeno disponible para suelos minerales y su índice de calidad química del suelo.

	NR	Interpretación	ICQS
<b>N disponible*</b> (mg/kg)	> 40	<b>Alto</b>	2
	20 - 40	<b>Medio</b>	1
	10 - 20	<b>Bajo</b>	-1
	< 10	<b>Muy bajo</b>	-2

Nota (\*): Nitrógeno disponible: (N-NO<sub>3</sub> + N-NH<sub>4</sub>).

**Cuadro 5.** Niveles de referencia de Fósforo (o fosfato, PO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) disponible para suelos minerales y su índice de calidad química del suelo.

	NR	Interpretación	ICQS
<b>PO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b> (mg/kg)	> 16	<b>Alto</b>	2
	8 - 16	<b>Medio</b>	1
	5 - 8	<b>Bajo</b>	-1
	< 4	<b>Muy bajo</b>	-2

**Cuadro 6.** Niveles de referencia de Potasio para suelos minerales y su índice de calidad química del suelo.

	NR	Interpretación	ICQS
<b>K<sup>+</sup></b> (cmol/kg)*	> 0,45	<b>Alto</b> Excelente reserva	2
	0,31 - 0,45	<b>Moderado</b> Niveles adecuados para la mayoría de las plantas	1
	0,16 - 0,30	<b>Bajo</b> Posibles deficiencias	-1
	< 0,15	<b>Muy bajo</b> Deficiencia decoloraciones bordes foliares	-2

Nota (\*): Para convertir cmol/kg en mg/kg multiplicar por 390.

**Cuadro 7.** Niveles de referencia de Calcio para suelos minerales y su índice de calidad química del suelo.

	NR	Interpretación	ICQS
<b>Ca<sup>2+</sup></b> (cmol/kg)	> 8,0	<b>Alto</b> Excelente reserva, probablemente suelos calcáreos	2
	4,1 - 8,0	<b>Moderado</b> Niveles adecuados para la mayoría de las plantas	1
	2,0 - 4,0	<b>Bajo</b> Posibles deficiencias	-1
	< 2,0	<b>Muy bajo</b> Severo agotamiento de Ca <sup>2+</sup> , efectos adversos.	-2

**Cuadro 8.** Niveles de referencia de Magnesio para suelos minerales y su índice de calidad química del suelo.

	NR	Interpretación	ICQS
<b>Mg<sup>2+</sup></b> (cmol/kg)	> 0,8	<b>Alto</b> Excelente reserva	2
	0,46 - 0,8	<b>Moderado</b> Niveles adecuados para la mayoría de las plantas	1
	0,21 - 0,45	<b>Bajo</b> Posibles deficiencias	-1
	< 0,21	<b>Muy bajo</b> Deficiencias	-2

**Cuadro 9.** Niveles de referencia de Sodio para suelos minerales y su índice de calidad química del suelo.

	NR	Interpretación	ICQS
<b>Na<sup>+</sup></b> <b>(cmol/kg)</b>	< 1,0	<b>Alto</b>	-2
	0,5 - 1,0	<b>Medio</b>	-1
	0,2 - 0,5	<b>Bajo</b>	1
	< 0,2	<b>Muy bajo</b>	2

**Cuadro 10.** Ejemplo parámetros evaluados e Índice de Calidad Química de Suelo Total (ICQS total).

Parámetros	Valores reportados por laboratorio	ICQS*
MO (%) (en suelos minerales o cenizas volcánicas)	6	3
pH	6,9	2
Nitrógeno disponible (mg/kg)	42	2
Fósforo (mg/kg)	17	2
Potasio (mg/kg)	520	2
Calcio (cmol/kg)	6	1
Magnesio (cmol/kg)	5	2
Sodio (cmol/kg)	0,1	2
	<b>ICQS Total</b>	<b>16</b>

Nota (\*): Según nivel de referencia (Cuadros 1-9).

**Cuadro 11.** Índice de Calidad Química Total del Suelo, interpretación según su nivel y recomendación general.

	ICQS Total	Interpretación del nivel de calidad	Recomendación
Valor de calidad química de suelos	> 16	Adecuada	Mantener manejo sostenible.
	8 - 16	Media	Identificar los valores críticos e implementar acciones de remediación.
	< 8	Baja	Identificar los valores críticos y diseñar plan de manejo sustentable.

Nota: En Anexos 6.1, 6.2 y 6.3 se presentan casos de estudio de distintos tipos de suelo y aplicación de la metodología para obtener ICQS e ICFS, así como resultados de aplicación de medidas de restauración.



**Figura 5.** Diagrama de decisiones para restauración calidad química de los suelos.

### 3.5. Bibliografía

- Alcántar, G., J.D. Etchevers y A. Aguilar. 1992. Los análisis físicos y químicos: su aplicación en agronomía. Colegio de Postgraduados. Centro de Edafología. Montecillo, México.
- Amacher M.C., K.P. O'Neill and C.H. Perry. 2007. Soil vital signs: a new soil quality index (SQI) for assessing forest soil health [en línea]. United States Department of Agricultura. <[https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs\\_rp065.pdf](https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_rp065.pdf)>. [Consulta: 24 abril 2014].
- ISO 11465. 1993. Soil quality. Determination of dry matter and water content on a mass basis - Gravimetric method. International Organization for Standardization, Genève, Switzerland. 3p.
- Sadzawka R., A, M.A. Carrasco R., R. Grez Z., M.L. Mora G., H. Flores P. y A. Neaman. 2006. Métodos de análisis de suelos recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas INIA No 34, Santiago, Chile, 164 p.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1996. Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Investigations Report No 42. Version 3.0. U.S. Department of Agriculture, Washington DC, USA, 693 p.



# 4

## INDICADORES DE CALIDAD FÍSICA DEL SUELO

### 4.1. Índice de Calidad Física de Suelos (ICFS)

Para evaluar el estado de la calidad física de los suelos afectados por el fuego, y por otros impactos y/o manejos, se utilizará la base conceptual propuesta para la calidad química de los suelos, adaptándola a las propiedades físicas de los suelos, pues tanto la metodología como la ejecución de análisis están disponibles en diversos laboratorios del país. Se utilizarán 8 parámetros físicos con sus respectivos valores umbrales, interpretación e índice asociado (materia orgánica, densidad aparente, macro y micro agregados, diámetro peso medio, altura de agua, porosidad total y conductividad hidráulica saturada). Los valores umbrales e índice asociado se encuentran en los Cuadros 12 a 20. El criterio de selección de estos indicadores se basa en la frecuencia de los problemas que se dan en los suelos, cuyas propuestas de remediación son aplicaciones de enmiendas y manejos mecánicos de frecuente uso en la agricultura.

Según corresponda los valores fueron ajustados a los suelos volcánicos (cenizas volcánicas), utilizando antecedentes de literatura para estos suelos (Sandoval *et al.*, 2012; SAG., 2011).

### 4.2. Análisis de las muestras

Los análisis de materia orgánica y el agua disponible tienen como base la fracción fina del suelo (< 2 mm). Las muestras de suelo son secadas a temperatura ambiente, hasta masa constante. Para los análisis de los parámetros densidad aparente (Da), macro agregados (MAC), microagregados (MIC), diámetro peso medio (DPM), altura de agua aprovechable (AWP), porosidad total (Pt) y conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) las muestras son tomadas de manera de no alterar su arreglo estructural. Estos parámetros se deben determinar mediante las técnicas analíticas propuestas por Sandoval *et al.*, 2012; Sadzawka *et al.*, 2006 y USDA, 1996.

### 4.3. Cálculo del Índice de Calidad Física del Suelo (ICFS)

Considerando los valores reportados por el laboratorio para los diferentes parámetros físicos evaluados, se procede a comparar estos con los niveles de referencia indicados en los Cuadros 12 al 20, los cuales a su vez están asociados a un valor de ICFS (ejemplo Cuadro 21). Una vez obtenidos los valores individuales de ICFS se procede a calcular el ICFS total:

**ICFS Total** = suma de los ICFS de los parámetros evaluados según sus niveles de referencia

**ICFS Total** = ICFS (MO) + ICFS (Da) + ICFS (Pt) + ICFS (MAC) + ICFS (MIC) + ICFS (DPM) + ICFS (AWP) + ICFS ( $K_s$ )

Los diferentes valores de referencia, interpretación y valor de ICFS se encuentran en los Cuadros 12 a 20.



**Figura 6.** Resumen de Cuadros donde se encuentran los ICFS.

Ejemplo: considerando una situación en la cual todos los niveles son óptimos:

$$\text{ICFS Total} = 3 (\text{MO}) + 2 (\text{Da}) + 2 (\text{Pt}) + 3 (\text{MAC}) + 3 (\text{MIC}) + 3 (\text{DPM}) + 3 (\text{AWP}) + 3 (\text{K}_s)$$

$$\text{ICFS Total} = 22 \text{ (ver Cuadro 21)}$$

El valor obtenido de ICFS Total es comparado (Cuadro 21), obteniendo una interpretación de la calidad física del suelo.

En consecuencia si el ICFS Total = 22, según Cuadro 21 la calidad del suelo es **ADECUADA** y la recomendación es “mantener el manejo actual”.

Si los valores de ICFS Total =15 o ICFS Total =5 por ejemplo, la calidad del suelo sería **MEDIA o BAJA** respectivamente, y la recomendación sería establecer medidas para restaurar primero los parámetros que indican una calidad baja y luego los que indican calidad moderada de manera de ir aumentando los valores mediante aplicaciones de enmiendas u otras técnicas que favorezcan mayores niveles de manera equilibrada y de acuerdo a los recursos disponibles (Figura 7).

*Nota: El máximo valor del ICFS total según los parámetros medidos es 22, enseguida el ICFS total también puede ser expresado como: % ICFS = (ICFS Total / ICFS tm) x 100, donde ICFS tm = índice de calidad física de suelo máximo.*

#### 4.4. Niveles de Referencia (NR) e Índice de Calidad Física del Suelo (ICFS)

A continuación se presentan los niveles de referencia y los valores de ICFS correspondientes. El resultado del análisis reportado por el laboratorio se ubica en el rango de NR y luego se verifica el valor correspondiente al ICFS. Si el valor es negativo, se debe considerar su resta en la fórmula de ICFS Total.

**Cuadro 12.** Niveles de referencia de Materia Orgánica para suelos minerales y su índice de calidad física del suelo.

	NR	Interpretación	ICFS
MO en suelos minerales (%)	≥ 6,0	Muy alto	3
	3,5 - 5,9	Alto	2
	2,0 - 3,4	Moderado	1
	0,5 - 1,9	Bajo	-1
	< 0,5	Muy bajo	-2

**Cuadro 13.** Niveles de referencia de MO para suelos derivados de cenizas volcánicas y su índice de calidad física del suelo.

	NR	Interpretación	ICFS
<b>MO en suelos cenizas volcánicas (%)</b>	≥ 17,0	<b>Muy alto</b>	3
	11 - 16,9	<b>Alto</b>	2
	5,0 - 10,9	<b>Moderado</b>	1
	3,0 - 4,9	<b>Bajo</b>	-1
	< 3,0	<b>Muy bajo</b>	-2

**Cuadro 14.** Niveles de referencia e índice de calidad física de suelos para Densidad aparente y Porosidad total para suelos de mineralogía cristalina (1:1,1:2).

<b>Da (Mg/m³)*</b>		<b>Pt (%)</b>		<b>ICFS</b>
NR	Interpretación	NR	Interpretación	
< 1,2	<b>Bajo</b>	> 50	<b>Alto</b>	2
1,2 - 1,3	<b>Medio</b>	48 - 50	<b>Medio</b>	1
1,4 - 1,5	<b>Alto</b>	47-43	<b>Bajo</b>	-1
> 1,5	<b>Muy alto</b>	<43	<b>Muy bajo</b>	-2

Nota (\*): Mg/m³ se interpreta como Megagramo/m³.

**Cuadro 15.** Niveles de referencia e índice de calidad física de suelos para Densidad aparente y Porosidad total para suelos derivados de cenizas volcánicas.

<b>Da (Mg/m³)*</b>		<b>Pt (%)</b>		<b>ICFS</b>
NR	Interpretación	NR	Interpretación	
< 0,6	<b>Bajo</b>	> 75	<b>Alto</b>	2
0,7 - 1,1	<b>Medio</b>	61 - 75	<b>Medio</b>	1
1,2 - 1,3	<b>Alto</b>	60 - 54	<b>Bajo</b>	-1
> 1,3	<b>Muy alto</b>	< 54	<b>Muy bajo</b>	-2

Nota (\*): Mg/m³ se interpreta como Megagramo/m³.

**Cuadro 16.** Niveles de referencia de Macroagregados para suelos minerales y su índice de calidad física del suelo.

	NR	Interpretación	ICFS
<b>MAC * (%)</b>	> 60	<b>Muy favorable</b>	3
	50 - 60	<b>Favorable</b>	2
	46 - 49	<b>Poco favorable</b>	1
	40 - 45	<b>Desfavorable</b>	-1
	< 40	<b>Totalmente desfavorable</b>	-2

Nota (\*): Agregados mayores a 0,25 mm.

**Cuadro 17.** Niveles de referencia de microagregados para suelos minerales y su índice de calidad física del suelo.

	NR	Interpretación	ICFS
<b>MIC * (%)</b>	> 60	<b>Totalmente desfavorable</b>	-2
	50 - 60	<b>Desfavorable</b>	-1
	46 - 49	<b>Poco favorable</b>	1
	40 - 45	<b>Favorable</b>	2
	< 40	<b>Muy favorable</b>	3

Nota (\*): Agregados menores a 0,25 mm.

**Cuadro 18.** Niveles de referencia de Diámetro Peso Medio ponderado para suelos minerales y su índice de calidad física del suelo.

	NR	Interpretación	ICFS
<b>DPM* (cm)</b>	> 1,5	<b>Muy estable</b>	3
	1,0 - 1,5	<b>Estable</b>	2
	0,8 - 0,9	<b>Poco estable</b>	1
	0,5 - 0,7	<b>Inestable</b>	-1
	< 0,5	<b>Muy inestable</b>	-2

Nota (\*): Este parámetro se considera un valor de estabilidad de los agregados.

**Cuadro 19.** Niveles de referencia de Altura de Agua Aprovechable para suelos minerales y su índice de calidad física del suelo.

	NR**	NR***	Interpretación	ICFS
<b>AWP* (cm)</b>	> 18	> 3,6	<b>Muy bueno</b>	3
	12 - 18	2,4 - 3,6	<b>Bueno</b>	2
	9,5 - 12	1,9 - 2,4	<b>Regular</b>	1
	5,0 - 9,5	1,0 - 1,9	<b>Pobre</b>	-1
	< 5,0	< 1,0	<b>Muy pobre</b>	-2

\*Obs: El cálculo deber hacerse para la profundidad efectiva.

\*\*Altura de agua aprovechable =  $((CC - PMP) / 100) * Da * PE$ , donde CC= capacidad de campo (% hbss); PMP= punto de marchitez permanente (%hbss); Da= densidad aparente (Mg/cm<sup>3</sup>); PE = profundidad efectiva (cm). Esta es la distancia desde la superficie del suelo a cualquier impedimento físico que impida el desarrollo de las raíces de las plantas.

\*\*\*También es factible comparar los primero 20 cm (profundidad de muestreo), realizando una aproximación, la cual considerara la profundidad efectiva de 100 cm y la altura de agua 1/5 del total de la profundidad efectiva.

**Cuadro 20.** Niveles de referencia de Conductividad hidráulica saturada (movimiento de agua en el perfil del suelo) para suelos minerales y su índice de calidad física del suelo.

	NR*	Interpretación** (Clases de Drenaje)	ICFS
<b>K<sub>s</sub> (cm/h)</b>	< 0,15	<b>Muy pobremente drenado</b>	-2
	0,15 - 0,5	<b>Pobremente drenado</b>	-1
	0,5 - 1,5	<b>Drenaje imperfecto</b>	1
	1,5 - 5,0	<b>Drenaje moderado</b>	2
	5,0 - 15,0	<b>Bien drenado</b>	3
	> 15,0	<b>Excesivamente drenado</b>	-1

\*Condiciones de evaluación en campo o laboratorio

\*\*El drenaje se refiere a la rapidez con que el agua ingresa desde la superficie y posteriormente se mueve a través del perfil del suelo, esto se encuentra relacionado con la permeabilidad y el escurrimiento superficial. Desde el punto de vista del suelo, las restricciones al drenaje natural pueden ser de diverso origen. Entre las más comunes se mencionan: la formación de horizontes o estratos poco permeables o cementados, posiciones topográficas desfavorables, entre otras (SAG, 2011).

**Cuadro 21.** Ejemplo parámetros evaluados e Índice de Calidad Física de Suelo Total (ICFS total).

Parámetros	Valores reportados por laboratorio	ICFS*
Materia Orgánica en suelos minerales (%)	6	3
Densidad Aparente (Mg/m <sup>3</sup> )	1,1	2
Porosidad total (%)	51	2
Macroagregados (%)	65	3
Microagregados (%)	35	3
Diámetro Peso Medio (cm)	2	3
Altura de agua aprovechable (cm)	4	3
Conductividad hidráulica K <sub>s</sub> (cm/h)	10	3
	<b>ICFS Total</b>	<b>22</b>

Nota (\*): Según nivel de referencia (Cuadros 12-20).

**Cuadro 22.** Índice de Calidad Física Total del Suelo, interpretación según su nivel y recomendación general.

	ICFS Total	Interpretación del nivel de calidad	Recomendación
<b>Valor de calidad física de suelos</b>	> 21	<b>Adecuado</b>	Mantener manejo sostenible
	21 - 9	<b>Medio</b>	Identificar los valores críticos e implementar acciones de remediación
	< 9	<b>Bajo</b>	Identificar los valores críticos y diseñar plan de manejo sustentable

Nota: En Anexos 6.1, 6.2 y 6.3 se presentan casos de estudio de distintos tipos de suelo y aplicación de la metodología para obtener ICQS e ICFS, así como resultados de aplicación de medidas de restauración.



**Figura 7.** Diagrama de decisiones para restauración calidad física de los suelos.

## 4.5. Bibliografía

- Day, P. R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. *In*: Black, C.A. (ed) Methods of soil analysis, Part I, Agronomy No 9, American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, p. 545-567.
- Dewis, J. and F. Freitas. 1970. Physical and chemical methods of soil and water analysis. FAO, Soils Bulletin No 10, Rome, Italy. 275 p.
- Porta, J., M. López y C. Roquero. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 1994. 807p.
- Sadzawka R., A. M.A. Carrasco R., R. Grez Z., M.L. Mora G., H. Flores P. y A. Neaman. 2006. Métodos de análisis de suelos recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas INIA No 34, Santiago, Chile, 164 p.

- Sandoval, M. Manejo de suelos en zonas áridas. (Eds.) Quezada, C., M. Sandoval y E. Zagal. Estructura y agregación en los suelos. Universidad de Concepción (ISBN 956-227- 293-1). Chillán, Chile. 2008. p118.
- Sheldrick, B.H. and C. Wang. 1993. Particle size distribution. *In*: Carter, M.R. (ed.) Soil sampling and methods of analysis. Chapter 47. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, p. 499-511.
- USDA (United States Department of Agriculture). 2004. Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Investigations Report No 42. Version 4.0. U.S. Department of Agriculture, Washington DC, USA, 700p.



# 5

## INDICADORES DE CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL SUELO

### 5.1. Calidad Microbiológica de Suelos

Para evaluar el estado de la calidad microbiológica de los suelos afectados por el fuego o por otros impactos, se debe tener en cuenta que los sistemas microbiológicos presentan su mayor actividad en los primeros 20 cm superficiales del suelo; su actividad, número y masa, dependen de variadas condiciones como temporalidad, clima, vegetación superficial, tipo de suelo y calidad y humedad de éste, relación C/N, por mencionar algunos.

Lo anterior hace difícil establecer valores estándares o niveles de referencia, en especial para la zona del estudio. Si bien es posible encontrar variados trabajos que involucran la actividad de los microorganismos en el suelo (ejemplo; respiración, actividad enzimática y otras), estos son estudios específicos.

### 5.2. Análisis de la actividad microbiana del suelo

Para evaluar la actividad microbiana del suelo se deberán realizar los siguientes análisis a las muestras de suelo:

- Mineralización de carbono (C) de la materia orgánica
- Tasa de respiración de la biomasa microbiana
- Actividad enzimática

#### 5.2.1 Mineralización de carbono

Los ensayos de mineralización tienen por objetivo verificar la transformación del carbono presente en la materia orgánica hasta fijarlo en el suelo o convertirlo en  $\text{CO}_2$ . Esta mineralización es efectuada por los microorganismos del suelo, los cuales a través de las enzimas presentes transforman las moléculas orgánicas en inorgánicas.

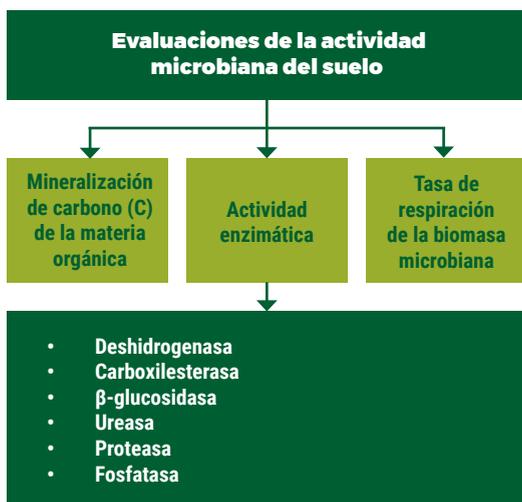
#### 5.2.2 Respiración microbiana

La respiración microbiana en el suelo se define como la capacidad de bacterias, hongos, algas y protozoos para absorber oxígeno y en consecuencia liberar  $\text{CO}_2$ . Por lo general, un suelo que posee un alto contenido de materia

orgánica mantiene una alta actividad microbiana y viceversa, un suelo con bajo contenido de materia orgánica presentará una baja actividad microbiana. La actividad microbiana se mide mediante la respiración microbiana, a través de la respiración basal ( $\mu\text{g C-CO}_2/\text{g suelo}$ ).

### 5.2.3 Actividad enzimática

Los microorganismos del suelo realizan la actividad enzimática, la cual es responsable de la captación de nutrientes, su fijación y transformación, permitiendo así mantener el funcionamiento del ecosistema del suelo. Las enzimas intervienen en los ciclos de elementos como el nitrógeno, mediante las enzimas ureasa y proteasa, del fósforo, mediante la enzima fosfatasa y del carbono mediante las enzimas  $\beta$ -glucosidasa y carboxilesterasa. Otra enzima relevante es la Deshidrogenasa, la cual constituye un indicador de la actividad microbiana del suelo, dado que depende de la presencia en el suelo de microorganismos vivos.



**Figura 8.** Opciones de análisis sugeridos para evaluar la calidad microbiológica de un suelo.



**Figura 9.** Opciones de medidas de restauración microbiológicas.



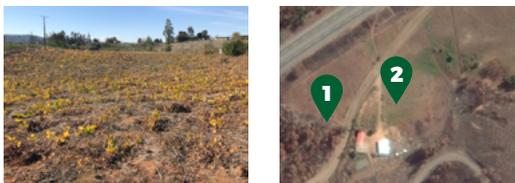
# 6

## ANEXOS

### 6.1. Caso de Estudio N°1 - Viñedo Cordillera de la Costa

En la Cordillera de la Costa (secano interior) se seleccionó un viñedo afectado por incendios en la comuna de Florida, sector Santa Rita. Se obtuvieron tres muestras compuestas para cada situación con y sin quema, las cuales fueron tomadas entre 0-20 cm de profundidad, estableciendo un diseño de muestreo completamente al azar. El área de muestreo para cada caso en estudio corresponde a  $50 \times 30 = 150 \text{ m}^2$ . Esta área, además, contempla el siguiente requerimiento para cada caso que requiere comparación: la misma serie de suelo o desarrollo edáfico, igual situación topográfica y rotación de cultivo.

Se tomaron muestras de suelo quemado (1) (Longitud 700577 E, Latitud 5932763 S) y suelo no quemado (2) (Longitud 700656 E, Latitud 5932780 S) a fin de evaluar la degradación de este suelo y el potencial impacto del fuego en diversos parámetros químicos y físicos de suelo.



**Figura 10.** Caso de Estudio N°1.

#### 6.1.1 Cálculo del Índice de Calidad Química del Suelo (ICQS)

Para el cálculo del índice de calidad química del suelo se utilizó la media de los valores obtenidos ( $n=3$ ). El ICQS del viñedo no quemado se presenta en el Cuadro 23, mientras que el ICQS del viñedo quemado se presenta en el Cuadro 24.

**Cuadro 23.** Estimación de ICQS en viñedo no quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 3.4.

Indicadores (Suelo No Quemado)	Valores	Interpretación	ICQS
pH	7,21	Ligeramente alcalino	1
Materia Orgánica (%)	1,22	Bajo	-1
Nitrógeno disponible (ppm)	5,10	Muy bajo	-2
Fósforo (ppm)	8,71	Medio	1
Potasio (ppm)	100,67	Bajo	-1
Calcio (cmol/kg)	5,62	Moderado	1
Magnesio (cmol/kg)	0,74	Moderado	1
Sodio (cmol/kg)	0,02	Muy bajo	2
<b>Total e Interpretación</b>		<b>Bajo</b>	<b>2</b>

Nota: ppm = mg/kg

**Cuadro 24.** Estimación de ICQS en viñedo quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 3.4.

Indicadores (Suelo Quemado)	Valores	Interpretación	ICQS
pH	6,20	Ligeramente ácido	1
Materia Orgánica (%)	1,47	Bajo	-1
Nitrógeno disponible (ppm)	7,22	Muy bajo	-2
Fósforo (ppm)	6,36	Bajo	-1
Potasio (ppm)	92,00	Bajo	-1
Calcio (cmol/kg)	3,48	Bajo	-1
Magnesio (cmol/kg)	0,83	Alto	2
Sodio (cmol/kg)	0,03	Muy bajo	2
<b>Total e Interpretación</b>		<b>Bajo</b>	<b>-1</b>

Nota: ppm = mg/kg

Tanto el suelo quemado como el no quemado presentaron un valor de calidad bajo (< 8) por lo que se deben identificar los valores críticos y diseñar un plan de manejo sustentable. La diferencia entre el suelo quemado y no quemado se refleja en el P disponible y Ca intercambiable, los cuales anterior al incendio presentaban niveles medio y alto respectivamente y posterior al mismo fueron bajo y moderado respectivamente. Adicionalmente, ambos suelos presentan niveles bajos de MO, N, P, Mg y K, correspondiendo todos a valores críticos.

### 6.1.2 Cálculo del Índice de Calidad Física del Suelo (ICFS)

El ICFS estimado en muestras de suelo (0-20 cm) correspondiente al viñedo no quemado se presenta en el Cuadro 25 y para el viñedo quemado en el Cuadro 26.

**Cuadro 25.** Estimación de ICFS en viñedo no quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 4.4.

Indicadores (Suelo No Quemado)	Valores	Interpretación	ICFS
Materia Orgánica (%)	1,22	Bajo	-1
Densidad Aparente (Mg/m <sup>3</sup> )	1,57	Muy alto	-2
Porosidad total (%)	46	Bajo	-1
Macroagregados (%)	26,65	Totalmente desfavorable	-2
Microagregados (%)	5,27	Muy favorable	3
Diámetro Peso Medio (cm)	0,34	Muy inestable	-2
Altura de Agua Aprovechable (cm)	1,93	Regular	1
Conductividad hidráulica (cm/h)	34,18	Excesivamente drenado	-1
<b>Total e Interpretación</b>		<b>Baja</b>	<b>-5</b>

**Cuadro 26.** Estimación de ICFS en viñedo quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 4.4.

Indicadores (Suelo Quemado)	Valores	Interpretación	ICFS
Materia Orgánica (%)	1,47	Bajo	-1
Densidad Aparente (Mg/m <sup>3</sup> )	1,58	Muy alto	-2
Porosidad total (%)	46	Bajo	-1
Macroagregados (%)	39,27	Totalmente desfavorable	-2
Microagregados (%)	5,53	Muy favorable	3
Diámetro Peso Medio (cm)	0,46	Muy inestable	-2
Altura de Agua Aprovechable (cm)	1,68	Pobre	-1
Conductividad hidráulica (cm/h)	37,94	Excesivamente drenado	-1
<b>Total</b>		<b>Baja</b>	<b>-7</b>

La mala calidad física de estos suelos se evidencia tanto en el viñedo afectado por el fuego como en el no afectado, resultando este último con un menor grado de deterioro; sin embargo, parte importante de los indicadores están influenciados por un contenido de gravas finas de cuarzo cercano al 30% o más presente en las muestras de suelo. La erosión en estos suelos ha generado pérdidas del horizonte A y parte del B, quedando en la superficie la transición de los horizontes genéticos (BC, B/C). Como es sabido estos suelos tienen su origen en la meteorización de la roca granítica cuyo mineral más duro de transformar en minerales secundarios (arcilla) es el cuarzo, por esta razón en la medida que nos acercamos al horizonte C, encontraremos mayor presencia de cuarzo. Estos aspectos explican los altos valores de densidad aparente, bajos contenidos de macroagregados, excesivo drenaje, y pobre retención de agua.

### 6.1.3 Plan de Manejo Sustentable para restauración de suelos degradados

Considerando que el suelo afectado por el fuego, presenta valores críticos en varios de los indicadores químicos, y utilizando el diagrama para restauración (Figura 5), se aplicó compost (características en Anexo 6.5) con la finalidad de incrementar el contenido de MO, N disponible y Mg, y los valores menos críticos como el K y P disponibles.

Los parámetros físicos evaluados (excepto microagregados) son críticos. En este contexto considerando que el viñedo es permanente, y no permite rotaciones con praderas u otros cultivos, y considerando el diagrama de decisiones para restauración de calidad física de los suelos (Figura 7), se reafirma la aplicación de compost, esta vez para mejorar el contenido de MO, Da, Macroagregados y DPM y el uso de la técnica de cincelado para mejorar la porosidad del suelo.

### 6.1.4 Cálculo del Índice de Calidad Química del Suelo (ICQS) Post Restauración

Para la restauración de estos suelos se realizó un cincelado y se aplicó compost en dosis de 2 toneladas ha, es decir 6 kg de compost por planta de vid. En la temporada siguiente se tomaron muestras de suelo para evaluar el impacto de las prácticas de restauración mediante el ICQS (Cuadro 27).

**Cuadro 27.** Estimación de ICQS en viñedo quemado (muestras 0-20 cm) post restauración (compost y cincelado) según NR definidos en la sección 3.4.

Indicadores (Suelo No Quemado)	Valores	Interpretación	ICQS
pH	7,32	Ligeramente alcalino	1
Materia Orgánica (%)	4,71	Alto	2
Nitrógeno disponible (ppm)	22,71	Medio	1
Fósforo (ppm)	112,91	Alto	2
Potasio (ppm)	354,29	Alto	2
Calcio (cmol/kg)	16,42	Alto	2
Magnesio (cmol/kg)	1,64	Alto	2
Sodio (cmol/kg)	0,21	Bajo	1
<b>Total e Interpretación</b>		<b>Medio</b>	<b>13</b>

Nota: ppm = mg/kg

**Cuadro 28.** Comparación de ICQS en viñedo quemado (muestras 0-20 cm) restaurado según NR definidos en la sección 3.4.

Indicadores	Suelo quemado Año 1		Suelo quemado Año 2	
	Valor	ICQS	Valor	ICQS
pH	6,20	1	7,32	1
Materia Orgánica (%)	1,47	-1	4,71	2
Nitrógeno disponible (ppm)	7,22	-2	22,71	1
Fósforo (ppm)	6,36	-1	112,91	2
Potasio (ppm)	92,00	-1	354,29	2
Calcio (cmol/kg)	3,48	-1	16,42	2
Magnesio (cmol/kg)	0,83	2	1,64	2
Sodio (cmol/kg)	0,03	2	0,21	1
<b>Total e Interpretación</b>	<b>Bajo</b>	<b>-1</b>	<b>Medio</b>	<b>13</b>

Nota: ppm = mg/kg

Los resultados obtenidos señalan una recuperación significativa del suelo (Cuadro 28), los indicadores reportados dejan claro que la intervención de este sistema productivo (viñedo) con propuestas simples y sustentables, permitieron respuesta en el corto plazo, verificándose en el valor del ICQS, el cual pasó de un nivel bajo a un nivel medio posterior a la restauración. En este contexto, los criterios que mejoraron corresponden a MO, N, P y K disponible y Ca y Mg intercambiable. La estabilidad de estos valores en el tiempo y el avance a un nuevo nivel, requiere de mayor tiempo de investigación, sin embargo, el protocolo de trabajo parece ser el correcto de manera de establecer procesos inteligentes basados en datos reales y que permitan el seguimiento en el tiempo.

### 6.1.5 Cálculo del Índice de Calidad Física del Suelo (ICFS) Post Restauración

Para la restauración de estos suelos se realizó un cincelado y se aplicó compost en dosis de 2 toneladas/ha, (6 kg de compost por planta de vid). Los resultados de la evaluación de los indicadores físicos posterior a la restauración del viñedo quemado se indican en el Cuadro 29.

**Cuadro 29.** Estimación de ICFS en viñedo quemado (muestras 0-20 cm) post restauración (compost y cincelado) según NR definidos en la sección 4.4.

Indicadores	Valores	Interpretación	ICFS
Materia Orgánica (%)	4,71	Alto	2
Densidad Aparente (Mg/m <sup>3</sup> )	1,59	Muy alto	-2
Porosidad total (%)	49	Medio	1
Macroagregados (%)	56,33	Favorable	2
Microagregados (%)	7,18	Muy favorable	3
Diámetro Peso Medio (cm)	0,72	Inestable	-1
Altura de Agua Aprovechable (cm)	2,16	Regular	1
Conductividad hidráulica (cm/h)	40,45	Excesivamente drenado	-1
<b>Total</b>		<b>Baja</b>	<b>5</b>

La calidad física del suelo posterior a la restauración continuó siendo baja, sin embargo varios indicadores mejoraron. El Cuadro 30 resume los indicadores físicos pre y post restauración del suelo afectado por el fuego.

**Cuadro 30.** Comparación de ICFS en viñedo quemado (muestras 0-20 cm) restaurado según NR definidos en la sección 4.4.

Indicadores	Suelo quemado Año 1		Suelo quemado Año 2	
	Valor	ICFS	Valor	ICFS
Materia Orgánica (%)	1,47	-1	4,71	2
Densidad Aparente (Mg/m <sup>3</sup> )	1,58	-2	1,59	-1
Porosidad total (%)	46	-1	50	1
Macroagregados (%)	39,27	-2	56,33	2
Microagregados (%)	5,53	3	7,18	3
Diámetro Peso Medio (cm)	0,46	-2	0,72	-1
Altura de Agua Aprovechable (cm)	1,68	-1	2,16	1
Conductividad hidráulica (cm/h)	37,94	-1	40,45	-1
<b>Total</b>		<b>-7</b>		<b>5</b>

El suelo en cuestión presenta una mejoría importante en el contenido de materia orgánica (3,2%), esto permite mejorar la actividad de los microorganismos, hecho que se demuestra en el último capítulo de este manual. Una consecuencia es la actividad de los microorganismos a través de sus distintos procesos enzimáticos y otro es intervenir en la edafogénesis de los suelos, es decir en la formación de estos, (Guajardo *et al.*, 2020, Alcivar *et al.*, 2018). De la misma manera, es la materia orgánica de manera directa o indirecta quien interviene en la formación de agregados en los suelos, contribuyendo a darle una organización jerarquizada al sistema edáfico, influyendo en aspectos tan relevantes como la estabilidad del sistema, la organización del espacio poroso y la capacidad de almacenar agua (Celis and Sandoval, 2019). Los resultados positivos obtenidos en este ensayo señalan cambios significativos en la formación de macroagregados y en la estabilidad de los mismos, además se incrementa la capacidad de almacenar agua para las plantas, sin embargo, aun existiría un amplio rango para mejorar aún más la calidad física de estos suelos.

## 6.2. Caso de Estudio N°2 - Cultivo Tradicional Depresión Intermedia

Para este estudio, se trabajó con un sitio ubicado en el valle central y se seleccionó un cultivo tradicional (trigo) afectado por un incendio en la comuna de Chillán, sector Los Puquios. Se obtuvieron tres muestras compuestas por cada situación a evaluar (zona afectada por el fuego y zona control no afectada por el fuego), las muestras fueron tomadas desde los primeros 20 cm de profundidad, estableciendo un diseño de muestreo completamente al azar. El área de muestreo para cada caso en estudio corresponde a  $50 \times 30 = 150 \text{ m}^2$ . Esta área de muestreo presentó la misma serie de suelo, desarrollo edáfico, igual situación topográfica y rotación de cultivos. Las muestras de suelo afectado por el fuego (H19 Longitud 234599 E, Latitud 5942231 S) y suelo no afectados por el fuego (H19 Longitud 235104 E, Latitud 5941987 S) fueron tomadas a fin de evaluar la degradación de este suelo y el potencial impacto del fuego en diversos indicadores de calidad química y física del suelo.



**Figura 11.** Caso de Estudio N°2.

### 6.2.1 Cálculo del Índice de Calidad Química del Suelo (ICQS)

Para el cálculo del índice de calidad química del suelo, se utilizó la media de los valores obtenidos ( $n=3$ ) en los diferentes indicadores evaluados. El ICQS del cultivo tradicional no quemado (trigo) se presenta en el Cuadro 31, mientras que el ICQS del cultivo tradicional quemado se presenta en el Cuadro 32.

**Cuadro 31.** Estimación de ICQS para el caso de cultivo tradicional no quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 3.4.

Indicadores (Suelo No Quemado)	Valores	Interpretación	ICQS
pH	5,39	Moderadamente ácido	-1
Materia Orgánica (%)	5,11	Moderado	1
Nitrógeno disponible (ppm)	67,79	Alto	2
Fósforo (ppm)	30,89	Alto	2
Potasio (ppm)	121,29	Moderado	1
Calcio (cmol/kg)	7,07	Moderado	1
Magnesio (cmol/kg)	2,41	Alto	2
Sodio (cmol/kg)	0,10	Muy bajo	2
<b>Total e Interpretación</b>		<b>Medio</b>	<b>10</b>

Nota: ppm = mg/kg

**Cuadro 32.** Estimación de ICQS para el caso de cultivo tradicional quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 3.4.

Indicadores (Suelo Quemado)	Valores	Interpretación	ICQS
pH	5,67	Ligeramente ácido	1
Materia Orgánica (%)	5,52	Moderado	1
Nitrógeno disponible (ppm)	29,59	Medio	1
Fósforo (ppm)	23,90	Alto	2
Potasio (ppm)	98,58	Bajo	-1
Calcio (cmol/kg)	7,97	Moderado	1
Magnesio (cmol/kg)	2,76	Alto	2
Sodio (cmol/kg)	0,31	Bajo	1
<b>Total e Interpretación</b>		<b>Bajo</b>	<b>8</b>

Nota: ppm = mg/kg

El suelo no quemado presentó una calidad química media mientras que el quemado presentó una calidad química baja. Se identificaron los valores críticos con la finalidad de implementar acciones de remediación, Se verificó que el N disponible, K y Na intercambiable anterior al incendio presentaban niveles alto, moderado y muy bajo respectivamente mientras que posterior al incendio los valores fueron medio, bajo y bajo respectivamente. Adicionalmente, ambos suelos presentan contenidos moderados de materia orgánica y pH ácido.

### 6.2.2 Cálculo del Índice de Calidad Física del Suelo (ICFS)

Se estimó el ICFS a partir de muestras de suelo tomadas en los primeros (0-20 cm), para el cultivo tradicional no quemado, cuyos resultados se indican en el (Cuadro 33) y suelo con cultivo tradicional quemado (Cuadro 34).

**Cuadro 33.** Estimación de ICFS para el caso de cultivo tradicional no quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 4.4.

Indicadores (Suelo No Quemado)	Valores	Interpretación	ICFS
Materia Orgánica (%)	5,11	Moderado	1
Densidad Aparente (Mg/m <sup>3</sup> )	1,36	Alto	-1
Porosidad total (%)	48	Muy bajo	-2
Macroagregados (%)	59,45	Favorable	2
Microagregados (%)	1,97	Muy favorable	3
Diámetro Peso Medio (cm)	0,92	Poco estable	1
Altura de Agua Aprovechable (cm)	3,6	Muy Bueno	3
Conductividad hidráulica (cm/h)	12,84	Bien drenado	3
<b>Total e Interpretación</b>		<b>Medio</b>	<b>10</b>

**Cuadro 34.** Estimación de ICFS para el caso de cultivo tradicional quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 4.4.

Indicadores (Suelo Quemado)	Valores	Interpretación	ICFS
Materia Orgánica (%)	5,52	Moderado	1
Densidad Aparente (Mg/m <sup>3</sup> )	1,29	Alto	-1
Porosidad total (%)	50	Muy bajo	-2
Macroagregados (%)	57,66	Favorable	2
Microagregados (%)	3,11	Muy favorable	3
Diámetro Peso Medio (cm)	0,80	Poco estable	1
Altura de Agua Aprovechable (cm)	4,1	Muy bueno	3
Conductividad hidráulica (cm/h)	12,14	Bien drenado	3
<b>Total e Interpretación</b>		<b>Medio</b>	<b>10</b>

En ambas situaciones evaluadas, el suelo afectado por el incendio y suelo no afectado, el índice de calidad física señala que no existen diferencias significativas entre ambos casos. El ICFS entrega una calidad media y los indicadores responsables de este nivel corresponden a una alta densidad aparente, baja estabilidad de los agregados y contenido moderado de materia orgánica, esto nos debe indicar la implementación de un manejo que permita el mejoramiento de estos parámetros.

### 6.2.3 Plan de Manejo Sustentable para restauración de suelos degradados

Según el diagrama de decisiones para restauración de los indicadores químicos del suelo (Figura 5), se decidió aplicar compost (características en Anexo 6.5) para incrementar la MO, N disponible, Ca y Mg, en el suelo afectado por el fuego.

Siempre debe tenerse en consideración que la metodología permite detectar no solo el efecto del fuego sino que también de otros manejos no sustentables y que han causado un deterioro en los suelos, de ahí que la condición de quema solo puede responsabilizar una proporción y el plan de manejo puede ayudar a detectar y recuperar suelos en general.

Los parámetros físicos críticos corresponden a Da, DPM y MO. En este contexto, según el diagrama de decisiones para restauración de calidad física de los suelos (Figura 7) se consideró la aplicación de compost para mejorar el contenido de estos parámetros.

La propuesta de restauración en esta situación involucró un experimento más complejo de manera de atender un problema de manejo histórico del suelo, considerando que el fuego no generó una condición significativamente diferente a la del no afectado. Por estas razones, se realizó un experimento con aplicaciones de materia orgánica (compost) en 3 dosis: i) 2 toneladas/ha, ii) 4 toneladas/ha y iii) 8 toneladas/ha. El experimento se realizó con un diseño de bloque completo al azar con cuatro repeticiones; en las parcelas experimentales se sembró ballica forrajera, además del uso del arado cincel en las labores de preparación de suelo.

#### **6.2.4 Cálculo del Índice de Calidad Química del Suelo (ICQS) Post Restauración**

En esta sección se presentan los resultados del ensayo post restauración (Cuadro 35) un año después de aplicada la restauración. El ensayo consideró las dosis de 2, 4 y 8 toneladas ha de compost aplicado y siembra de ballica.

**Cuadro 35.** Comparación de ICQS en cultivo tradicional (muestras 0-20 cm) restaurado según NR definidos en la sección 3.4.

Indicadores	Suelo quemado Año 1		Suelo restaurado Año 2					
			2 ton/ha		4 ton/ha		8 ton/ha	
	Valor	ICQS	Valor	ICQS	Valor	ICQS	Valor	ICQS
pH	5,67	1	6,11	1	6,033	1	6,10	1
Materia Orgánica (%)	5,52	1	6,66	1	6,82	1	6,72	1
Nitrógeno (ppm)	29,59	1	12,04	-1	11,60	-1	15,21	-1
Fósforo (ppm)	23,90	2	126,78	2	131,75	2	129,31	2
Potasio (ppm)	98,58	-1	290	2	237,11	2	254	2
Calcio (cmol/kg)	7,97	1	9,49	2	9,16	2	9,61	2
Magnesio (cmol/kg)	2,76	2	1,89	2	1,88	2	1,98	2
Sodio (cmol/kg)	0,31	1	0,23	2	0,22	1	0,23	1
<b>Total</b>		<b>8</b>		<b>10</b>		<b>10</b>		<b>10</b>

Nota: ppm = mg/kg

Los resultados demuestran que el ICQS total, varió de BAJO a MEDIO, esto se debería al manejo propuesto (Cuadro 35), sin embargo, dos criterios cambian posterior a la restauración, el N disponible disminuye, mientras que el K intercambiable aumenta, esto puede atribuirse a la demanda de nitrógeno que ejerce el cultivo de ballica. Esto pone de manifiesto que las medidas aplicadas no fueron suficientes y obliga volver a revisar el árbol de decisiones (Figura 5) de lo cual se concluye que para el próximo periodo se debe suplementar con una fuente nitrogenada y mejorar la acidez del suelo con aplicaciones de carbonato de calcio.

### 6.2.5 Cálculo del Índice de Calidad Física del Suelo (ICFS) Post Restauración

Los ICFS estimados para las muestras de suelo tomadas de (0-20 cm) para el caso del cultivo tradicional afectado por el fuego y post restauración considerando las distintas dosis de compost y el uso de arado cincel en la preparación de suelo, se presentan en el Cuadro 36.

**Cuadro 36.** Comparación de ICFS en cultivo tradicional (muestras 0-20 cm) restaurado según NR definidos en la sección 4.4.

Indicadores	Suelo quemado Año 1		Suelo restaurado Año 2					
			2 ton/ha		4 ton/ha		8 ton/ha	
	Valor	ICFS	Valor	ICFS	Valor	ICFS	Valor	ICFS
Materia Orgánica (%)	5,52	1	6,66	1	6,82	1	6,72	1
Densidad Aparente (Mg/m <sup>3</sup> )	1,29	-1	1,14	1	1,21	-1	1,16	1
Porosidad total (%)	50	-2	56	-1	53	-2	55	-1
Macroagregados (%)	57,66	2	77,82	3	79,28	3	86,58	3
Microagregados (%)	3,11	3	1,38	3	1,41	3	0,75	3
Diámetro Peso Medio (cm)	0,80	1	1,28	2	1,31	2	1,55	3
Altura de Agua Aprovechable (cm)	4,1	3	3,7	3	3,8	3	3,6	3
Conductividad hidráulica (cm/h)	12,14	3	8,19	3	7,40	3	6,55	3
<b>Total</b>		<b>10</b>		<b>15</b>		<b>13</b>		<b>16</b>

Según los antecedentes experimentales, las medidas propuestas no marcaron diferencia en el aspecto de calidad física del suelo, sin embargo, se obtuvieron mejoras en la estabilidad y proporción de macroagregados, esto debe ser interpretado como un mejoramiento en la estabilidad del sistema suelo. Además, la mayor dosis de compost fue quien obtuvo la mayor puntuación en relación a la calidad física del suelo tratado lo cual puede deberse al incremento de materia orgánica en 1,2%.

En consecuencia los ensayos de campos requieren de mayor número de años de investigación para obtener mejores antecedentes que permitan tomar mejores decisiones en el tiempo.

### 6.3. Caso de Estudio N°3 – Cultivo Tradicional Precordillera

Para la condición de Precordillera andina se seleccionó un cultivo tradicional (trigo) afectado por el fuego, en la comuna de Cato, sector Nahueltoro. Se obtuvieron tres muestras compuestas para cada situación a estudiar, con y sin efecto del fuego, las cuales fueron tomadas a la profundidad de (0-20 cm), estableciendo un diseño de muestreo completamente al azar. El área de muestreo para cada caso evaluado correspondió a  $50 \times 30 = 150 \text{ m}^2$ . Esta área, además consideró los siguientes requerimientos: la misma serie de suelo o desarrollo edáfico, igual situación topográfica y rotación de cultivo.

Las muestras fueron tomadas de suelo quemados (H19 Longitud 252334 E, Latitud 5953513 S) y suelo no quemado (Longitud 252334 E, Latitud 5953513 S) a fin de evaluar la degradación de este suelo y el potencial impacto del fuego de diversos parámetros químicos y físicos de suelo.



**Figura 12.** Caso de Estudio N°3.

#### 6.3.1 Cálculo del Índice de Calidad Química del Suelo (ICQS)

Para el cálculo del índice de calidad química del suelo se utilizó la media de los valores obtenidos ( $n=3$ ). El ICQS con relación al cultivo tradicional no quemado se presenta en el Cuadro 37, mientras que el ICQS del cultivo tradicional quemado se presenta en el Cuadro 38.

**Cuadro 37.** Estimación de ICQS para el caso de cultivo tradicional no quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 3.4.

Indicadores (Suelo No Quemado)	Valores	Interpretación	ICQS
pH	5,59	Ligeramente ácido	1
Materia Orgánica (%)	5,85	Moderado	1
Nitrógeno disponible (ppm)	8,57	Muy bajo	-2
Fósforo (ppm)	22,77	Alto	2
Potasio (ppm)	85,33	Bajo	-1
Calcio (cmol/kg)	7,30	Alto	2
Magnesio (cmol/kg)	1,63	Bajo	-1
Sodio (cmol/kg)	0,29	Bajo	1
<b>Total e Interpretación</b>		<b>Bajo</b>	<b>3</b>

Nota: ppm = mg/kg

**Cuadro 38.** Estimación de ICQS para el caso de cultivo tradicional quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 3.4.

Indicadores (Suelo Quemado)	Valores	Interpretación	ICQS
pH	5,49	Moderadamente ácido	-1
Materia Orgánica (%)	5,29	Moderado	1
Nitrógeno disponible (ppm)	6,37	Muy bajo	-2
Fósforo (ppm)	19,77	Alto	2
Potasio (ppm)	58,67	Bajo	-1
Calcio (cmol/kg)	6,74	Moderado	1
Magnesio (cmol/kg)	1,88	Alto	2
Sodio (cmol/kg)	0,22	Bajo	1
<b>Total e Interpretación</b>		<b>Bajo</b>	<b>3</b>

Nota: ppm = mg/kg

La interpretación de los Cuadros 37 y 38 permite identificar que tanto el suelo quemado como el no quemado presenten un valor de calidad química baja (ICQS bajo 8). Esto indica que se deben identificar los valores críticos y diseñar un plan de manejo sustentable. La diferencia entre el suelo quemado y no quemado se refleja en el pH o acidez del suelo; este pasó de ligeramente ácido antes del incendio a moderadamente ácido posterior a incendio, además ambas situaciones evaluadas presentan contenidos de materia orgánica moderada y tanto el nitrógeno disponible como el potasio y magnesio presentan niveles deficitarios.

### 6.3.2 Cálculo del Índice de Calidad Física del Suelo (ICFS)

El ICFS estimado del suelo en los primeros (0-20 cm) para el caso del cultivo tradicional no quemado se presenta en el Cuadro 39 y para el suelo del cultivo tradicional quemado en el Cuadro 40.

**Cuadro 39.** Estimación de ICFS para el caso de cultivo tradicional no quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 4.4.

Indicadores (Suelo No Quemado)	Valores	Interpretación	ICFS
Materia Orgánica (%)	5,85	Moderado	1
Densidad Aparente (Mg/m <sup>3</sup> )	1,37	Muy alto	-2
Porosidad total (%)	47	Muy bajo	-2
Macroagregados (%)	55,44	Favorable	2
Microagregados (%)	2,49	Muy favorable	3
Díámetro Peso Medio (cm)	0,88	Poco estable	1
Altura de Agua Aprovechable (cm)	3,56	Muy Bueno	3
Conductividad hidráulica (cm/h)	4,45	Drenaje moderado	2
<b>Total e Interpretación</b>		<b>Bajo</b>	<b>8</b>

**Cuadro 40.** Estimación de ICFS para el caso de cultivo tradicional quemado (muestras 0-20 cm) según NR definidos en la sección 4.4.

Indicadores (Suelo Quemado)	Valores	Interpretación	ICFS
Materia Orgánica (%)	5,29	Moderado	1
Densidad Aparente (Mg/m <sup>3</sup> )	1,32	Muy alto	-1
Porosidad total (%)	47	Muy bajo	-2
Macroagregados (%)	60,56	Muy favorable	2
Microagregados (%)	2,57	Muy favorable	3
Diámetro Peso Medio (cm)	0,90	Poco estable	1
Altura de Agua Aprovechable (cm)	3,6	Muy bueno	3
Conductividad hidráulica (cm/h)	4,31	Drenaje moderado	2
<b>Total e Interpretación</b>		<b>Medio</b>	<b>9</b>

Los resultados encontrados en el suelo quemado y el suelo no quemado, corresponden a un índice de calidad medio y bajo respectivamente. En este contexto, el mejoramiento físico debe ser guiado al aumento de la materia orgánica en el suelo, la cual resultó moderada, esto en el sentido de reducir el valor de la densidad aparente. En general, el fuego no afectó mayormente la calidad física de este suelo. Los suelos del orden Andisol presentan buenas características físicas, sin embargo, el uso continuo de estos, sin manejos sustentables, lleva a la disminución de la materia orgánica y a presentar procesos de compactación que alteran la organización estructural y cuya consecuencia es la disminución de la porosidad, del almacenaje de agua y del intercambio de flujos, afectando la sanidad de los suelos y sus propiedades originales o naturales.

### **6.3.3 Plan de Manejo Sustentable para restauración de suelos degradados**

Desde el punto de vista químico, el suelo presentó valores críticos en varias variables o indicadores como pH, N disponible, K y Mg. Los valores críticos de los indicadores físicos, tanto para el suelo quemado como para el no quemado correspondieron a Da y MO. Según lo recomendado en el diagrama de decisiones propuesto para restauraciones físicas (Figura 7), se aplicó compost para incrementar la MO, y potenciar las variables físicas mejorando la Da y con ello la porosidad del suelo. Si bien, se podría haber incorporado en la preparación de suelos el arado cincel, el experimento no lo consideró con el objetivo de probar si la falta de una medida recomendada se refleja en la calidad del suelo post restauración, hecho que al final de este experimento los indicadores físicos fueron capaces de detectar, lo que permite validar de mejor manera el modelo de trabajo.

Finalmente, se realizó un experimento de campo con aplicaciones de materia orgánica (compost) en 3 dosis: i) 2 toneladas/ha, ii) 4 toneladas/ha y iii) 8 toneladas/ha. El experimento obedece a un diseño de bloque completo al azar con tres repeticiones, en parcelas experimentales donde se sembró maíz. El resto de los manejos se mantuvieron de acuerdo a las indicaciones técnicas (dosis de semilla, fertilidad y controles de plaga).

### **6.3.4 Cálculo del Índice de Calidad Química del Suelo (ICQS) Post Restauración**

Para la restauración de estos suelos, se aplicó compost en las siguientes dosis: i) 2 toneladas/ha, ii) 4 toneladas/ha y iii) 8 toneladas/ha. Posteriormente a la cosecha del maíz se tomaron muestras de suelo, luego se siguió el mismo criterio para evaluar el impacto de las prácticas de restauración según el modelo del ICQS (Cuadro 41).

**Cuadro 41.** Comparación de ICQS en cultivo tradicional (muestras 0-20 cm) restaurado según NR definidos en la sección 3.4.

Indicadores	Suelo quemado Año 1		Suelo restaurado Año 2					
			2 ton/ha		4 ton/ha		8 ton/ha	
	Valor	ICQS	Valor	ICQS	Valor	ICQS	Valor	ICQS
pH	5,49	-1	5,36	-1	5,56	1	5,6	1
Materia Orgánica (%)	5,29	1	7,50	1	7,87	1	7,82	1
Nitrógeno disponible (ppm)	6,37	-2	115,26	2	94,05	2	110,42	2
Fósforo (ppm)	19,77	2	15,5	1	11,68	1	13,11	1
Potasio (ppm)	58,67	-1	59,33	-1	42,22	-2	63,33	-1
Calcio (cmol/kg)	6,74	1	9,63	2	9,87	2	10,35	2
Magnesio (cmol/kg)	1,88	2	2,14	2	2,12	2	2,34	2
Sodio (cmol/kg)	0,22	1	0,19	2	0,24	1	0,28	1
<b>Total</b>		<b>3</b>		<b>8</b>		<b>8</b>		<b>9</b>

Nota: ppm = mg/kg

El cuadro 41 resume los valores medios (n=3) donde se observan los cambios químicos en el suelo afectado por el fuego y posterior a la restauración. El N disponible mejoró con las aplicaciones de materia orgánica (compost), mientras el P disponible disminuyó post restauración.

En general el ICQS se mantuvo en un nivel bajo posterior a la restauración, sin embargo, aumentó de 3 a 8 con dosis de 2 y 4 toneladas/ha, y con aplicación 8 toneladas/ha el ICQS aumentó a 9. Esto debe entenderse como un progreso, pero se recomienda revisar el protocolo de trabajo propuesto en este manual para tomar las nuevas decisiones y poder llevar este suelo a niveles de mejor calidad.

### 6.3.5 Cálculo del Índice de Calidad Física del Suelo (ICFS) Post Restauración

Referente a los indicadores físicos, el Cuadro 42 presenta las evaluaciones del ICFS posterior a la restauración (aplicación de compost).

**Cuadro 42.** Comparación de ICFS en cultivo tradicional (muestras 0-20 cm) restaurado según NR definidos en la sección 4.4.

Indicadores	Suelo quemado Año 1		Suelo restaurado Año 2					
			2 ton/ha		4 ton/ha		8 ton/ha	
	Valor	ICFS	Valor	ICFS	Valor	ICFS	Valor	ICFS
Materia Orgánica (%)	5,29	1	7,50	1	7,87	1	7,82	1
Densidad Aparente (Mg/m <sup>3</sup> )	1,32	-2	1,28	-1	1,23	-1	1,17	1
Porosidad total (%)	47	-2	49	-2	47	-2	55	-1
Macroagregados (%)	60,56	3	63,94	3	67,70	3	63,96	3
Microagregados (%)	2,57	3	6,16	3	7,64	3	7,03	3
Diámetro Peso Medio (cm)	0,90	1	0,83	1	0,81	1	0,89	1
Altura de Agua Aprovechable (cm)	3,56	3	3,58	3	3,66	3	3,6	3
Conductividad hidráulica (cm/h)	4,31	2	4,19	2	4,53	2	4,21	2
<b>Total</b>		<b>9</b>		<b>10</b>		<b>10</b>		<b>13</b>

La calidad física del suelo se mantuvo sin cambios considerables, sin embargo, existe una tendencia a disminuir la densidad aparente en la medida que se aumentó la dosis de materia orgánica, similar situación ocurrió con la proporción de macroagregados. Estos resultados podrían haber sido mejores, de haber incluido el uso de un arado cincel dentro de la preparación del suelo antes de la siembra. Sin embargo, el experimento se diseñó de esta manera para probar que muchas situaciones requieren de una combinación mecánica junto a las químicas, de manera de obtener una restauración más apropiada y en menos tiempo, por lo mismo se debe repetir el protocolo del manual, efectuando las correcciones y volver a evaluar.

## 6.4. Caso de Estudio N°4 - Calidad Microbiológica (Respiración microbiana y Actividad enzimática) de suelos afectados por incendios

Para evaluar el estado de la calidad microbiológica de los suelos afectados por el fuego, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones: i) los sistemas microbiológicos presentan su mayor actividad en los primeros 10 cm superficiales del suelo, ii) su actividad, número y masa, dependen de variadas condiciones como temporalidad, clima, vegetación superficial, tipo de suelo y calidad de este, humedad del suelo, relación C/N, por mencionar algunos.

En este contexto, se hace difícil establecer valores estándares o niveles de referencia, en especial para la zona en estudio de la región del Biobío y Ñuble y si bien es posible encontrar variados trabajos que involucran la actividad de los microorganismos en el suelo (por ejemplo respiración, actividad enzimática y otras), estos son estudios específicos. Por estas razones en este manual y dado el conocimiento actual se utilizarán como valores de referencia situaciones contrapuestas, en este caso, suelo afectado por incendio versus suelo no afectado por incendio, condición que en adelante llamaremos **situación control**.

Nota: los resultados presentados corresponden a un avance de la tesis de magister de la Sra. ROSA EUGENIA VERGARA RETAMALES. CHILLÁN-CHILE.2020. Magíster en Ciencias Agronómicas con Mención en Suelos y Recursos Naturales. Universidad de Concepción. Financiada por el proyecto ARIII70003, ANID Regional.

### 6.4.1 Calidad microbiológica (respiración microbiana) en suelos afectados por incendios

Para este propósito se tomaron muestras de suelo a diferentes profundidades (0-5 y 5-10 cm) en cada uno de los sectores: secano interior (Cordillera de la Costa), Depresión intermedia (Valle central) y Precordillera andina, con la presencia del factor fuego y en ausencia del factor. Para medir la respiración del suelo se realizó una incubación cerrada de suelo con trampa de álcali por 56 días en a 20°C y 60% de saturación del espacio poroso de agua del suelo.

Los resultados obtenidos de tasas de respiración de cada sector se presentan en el Cuadro 43 junto a los valores de respiración acumulada al día 28 y 56 de incubación para cada suelo

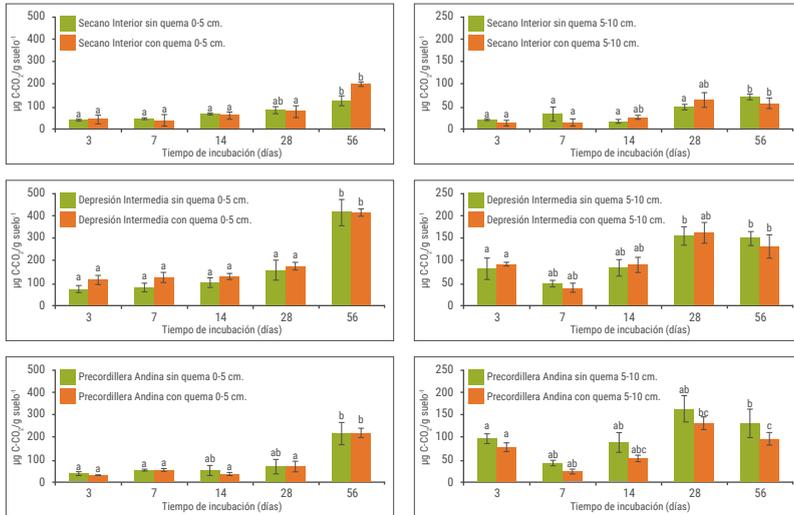
**Cuadro 43.** Valores de tasa de respiración y respiración acumulada medidos para los suelos de los tres sectores fisiográficos.

Ubicación	Factor	CO <sub>2</sub> -C (µg/g suelo seco) acumulado día 56 0-5 cm	Tasa de respiración (µg/g suelo seco*día) 0- 5 cm	CO <sub>2</sub> -C (µg/g suelo seco) acumulado día 56 5-10 cm	Tasa de respiración (µg/g suelo seco*día) 5- 10 cm	CO <sub>2</sub> -C (µg/g suelo seco) acumulado día 56 0-10
Secano Interior (Cordillera de la Costa)	Sin Quema	426,7	7,6	136,5	2,4	377,8
		330,5	5,9	129,5	2,3	320,8
		303,7	5,4	94,4	1,7	356,8
	Con Quema	492,4	8,8	265,7	4,7	490,1
		343,9	6,1	112,1	2,0	203,9
			165,7	3,0	115,9	
Depresión Intermedia (Valle Central)	Sin Quema	961,9	17,2	479,0	8,6	812,4
		702,2	12,5	382,6	6,8	588,6
		863,4	15,4	662,2	11,8	954,8
	Con Quema	843,1	15,1	435,1	7,8	751,6
		1038,1	18,5			607,8
	1031,2	18,4	591,9	10,6	1075,3	
Precordillera Andina	Sin Quema	277,9	5,0	429,3	7,7	602,2
		196,2	3,5	715,6	12,8	714,6
		191,0	3,4	421,1	7,5	508,3
	Con Quema	241,0	4,3	396,5	7,1	535,0
		200,4	3,6	372,9	6,7	420,0

Los valores de respiración acumulada no fueron diferentes estadísticamente entre suelos con quema y sin quema para las dos profundidades estudiadas (0-5 y 5-10 cm de profundidad) y en los tres ecosistemas estudiados.

Los valores de emisión de C-CO<sub>2</sub> en la primera profundidad de 0-5 cm del suelo, aumentaron a medida que se incrementó el tiempo de incubación en los tres casos (Figura 13). Los valores totales de respiración microbiana en todo el periodo de estudio, siguieron el siguiente orden; depresión intermedia

(842-971  $\mu\text{g C-CO}_2/\text{g suelo}$ ) > secano costero (353-418  $\mu\text{g C-CO}_2/\text{g suelo}$ ) y precordillera andina (411-436  $\mu\text{g C-CO}_2/\text{g suelo}$ ) (Figura 13).



**Figura 13.** Respiración microbiana del suelo en las tres condiciones fisiográficas del centro de Chile afectadas por incendio.

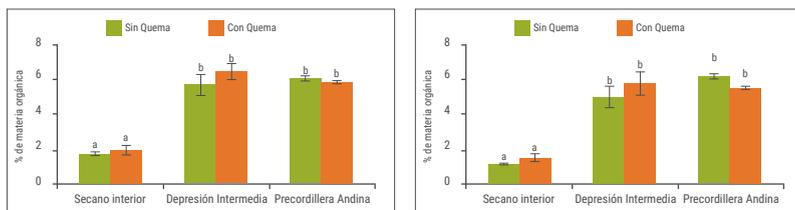
En el agrosistema de viñas ubicado en el secano interior, la actividad de la biomasa microbiana no se ve afectada en las evaluaciones temporales de mineralización de C realizadas a los 3, 7, 14 y 28 días de incubación del suelo, donde las diferencias entre suelo con y sin quema fueron estadísticamente iguales. En la última evaluación, el día 56 de incubación, la diferencia entre la mineralización de C en el suelo con quema fue notablemente mayor, pero aun así no se encontraron diferencias significativas. Por su parte, en suelos de la depresión intermedia, los resultados también mostraron no tener diferencias significativas entre suelo con y sin quema en todas las evaluaciones. Finalmente, para el sector de Precordillera andina los valores de respiración microbiana obtenidos fueron similares a los del sector de secano interior (Cordillera de la costa) y tampoco presentaron diferencias significativas entre suelos afectados y no afectados por quemas.

En cambio para la evaluación de la respiración de los suelos en la segunda profundidad los valores de emisión de C-CO<sub>2</sub> en la profundidad de 5-10 cm del suelo, son menores que los

de la primera profundidad para los suelos de secano costero (Cordillera de la Costa) y depresión intermedia (Valle Central), menos de la mitad, no así para Precordillera andina, donde los valores son similares a la primera profundidad los días 3, 7 y 14.

Los valores de respiración microbiana en la estrata más profunda a través del tiempo fueron distintos a los presentados en la primera profundidad para los suelos de la depresión intermedia (Valle central) y Precordillera andina, estos presentando un descenso en los días 7 y 14, para luego volver a incrementarse para el día 28 y 56 (Figura 13).

El hecho de que no se encontraran diferencias significativas entre los suelos con y sin quema puede explicarse en base a que los cambios ocurridos en la materia orgánica de los suelos no hayan sido suficientes como para producir un cambio en su disponibilidad hacia los microorganismos del suelo, como se ve en la Figura 14.



**Figura 14.** Porcentaje de materia orgánica en tres condiciones fisiográficas del centro-sur de Chile afectadas por incendio.

Las diferencias entre depresión intermedia y los agrosistemas de Costa y Precordillera podría deberse a la calidad de la materia orgánica de los sistemas productivos.

En el estudio realizado por Zagal, *et al.*, 2009, donde se analizó el efecto de rotaciones de cultivo se encontraron valores de 171,4 a 465,8  $\mu\text{g C/g}$  suelo a los 10 días de incubación y 420,4 a 1045,5  $\mu\text{g C/g}$  suelo a los 30 días.

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que la respiración basal como fuente de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera resultado de la mineralización del carbono, no se vio afectada por el factor fuego. Así, se puede afirmar que no habría aumento del aporte de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera producto de la mineralización de C producido por los microorganismos del suelo, debido a un cambio en proceso en cada sitio estudiado. Por otro lado, los valores de materia orgánica tampoco fueron alterados por el fuego, lo que refuerza la dependencia de estos indicadores

con este parámetro. Estos hechos indican que la calidad de la materia orgánica de los suelos de los tres ecosistemas no fue modificada por el factor fuego debido probablemente a una baja intensidad y severidad de los incendios/quema en los sitios particulares.

Como sugerencia para futuras investigaciones se propone la evaluación de la severidad e intensidad del factor fuego y su efecto en la calidad de la materia orgánica.

#### **6.4.2 Calidad microbiológica (actividad enzimática) en suelos afectados por incendios**

La calidad del suelo utilizando indicadores microbiológicos se ha probado en sistemas forestales a mediano plazo, mostrando una disminución en la actividad de la biomasa de carbono microbiano (C),  $\beta$ -glucosidasa y ureasa (Fernández-García *et al.*, 2019). A su vez, la actividad de la  $\beta$ -glucosidasa y la N-acetil-glucosaminidasa del suelo medidas tan solo cuatro meses después de un incendio han indicado un cambio en la disponibilidad de nutrientes en los suelos forestales (Knelman *et al.*, 2017). La respiración heterotrófica del suelo se usa como indicador de los cambios del suelo en los sistemas agrícolas, y también se aplica para estudiar el efecto del fuego bajo un control de quema controlado (Girona-García *et al.*, 2018). Por lo discutido anteriormente, se consideraron las enzimáticas relacionadas con los ciclos del carbono (carboxilesterasa,  $\beta$ -glucosidasa), nitrógeno (ureasa y proteasa) y fósforo (fosfatasa ácida), como indicadores de cambios en el suelo en un entorno mediterráneo perturbado por incendios.



**Figura 15.** Análisis de actividad microbiológica en función de ciclos de elementos y enzimas.

Para este estudio, se seleccionaron sitios con cultivos afectados por el fuego para las 3 condiciones evaluadas (Cordillera de la Costa, Valle Central o Depresión Intermedia y Precordillera Andina) como se detalla en el Cuadro 44.

**Cuadro 44.** Datos generales de sitios de muestreo.

Ubicación fisiográfica	Coordenadas Cultivo afectado por el fuego	Coordenadas Cultivo control no afectado por el fuego
Cordillera de la Costa (Secano interior)	Viñedo Longitud 700577 E Latitud 5932763 S	Viñedo Longitud 700656 E Latitud 5932780 S
Valle Central (Depresión intermedia)	Trigo H19 Longitud 234599 E Latitud 5942231 S	Trigo H19 Longitud 235104 E Latitud 5941987 S
Precordillera Andina	Trigo H19 Longitud 252334 E Latitud 5953513 S	Trigo Longitud 252334 E Latitud 5953513 S

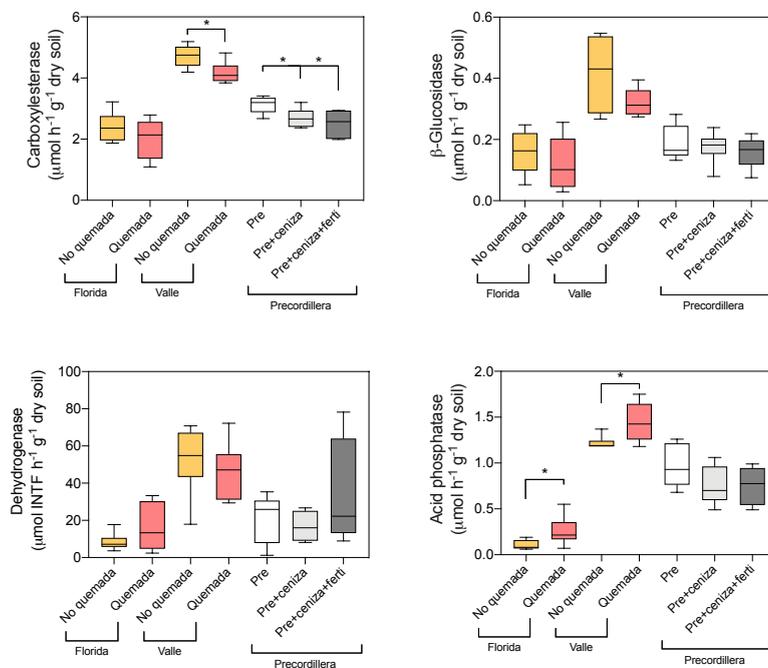
Para cada caso estudiado, se obtuvieron tres muestras compuestas por situación fisiográfica y cultivo a estudiar, con y sin efecto del fuego, las cuales fueron tomadas a las profundidades entre 0-5 y 5-10 cm, estableciendo un diseño

de muestreo completamente al azar. El área de muestreo para cada caso en estudio corresponde a  $50 \times 30 = 150 \text{ m}^2$ . Además, las comparaciones con y sin quema para cada situación consideró la misma serie de suelo o desarrollo edáfico e igual situación topográfica y rotación de cultivo.

Los análisis enzimáticos se realizaron en el Laboratorio de Ecotoxicología de la Universidad de Castilla-La Mancha en muestras de suelo enviadas a este laboratorio\*, usando diferentes metodologías. En el caso de la Carboxilesterasa, la actividad fue medida usando diferentes sustratos de acuerdo con Sánchez-Hernández *et al.*, (2015). De igual manera, la fosfatasa ácida y  $\beta$ -glucosidasa se determinaron de acuerdo a Popova *et al.*, (2010) mientras que la ureasa y proteasa según lo propuesto por Schinner *et al.*, (1996). Finalmente la Dehidrogenasa según lo indicado por von Mersi and Schinner (1991).

\*Nota: los suelos se enviaron desde Chile a España, los resultados presentados corresponden a un avance realizado por el Dr. Juan Carlos Sánchez, en su Laboratorio de Ecotoxicología de la Universidad de Castilla-La Mancha. Los análisis fueron un aporte al proyecto ARII170003, ANID Regional.

Los resultados obtenidos mostraron que, en general, las actividades enzimáticas fueron superiores en los suelos del Valle Central (Depresión intermedia) respecto a aquellas de los suelos de la comuna de Florida (Cordillera de la Costa) o de la Precordillera Andina (Figura 16). Este hallazgo puede estar relacionado con el contenido en materia orgánica de estos suelos o su manejo, así como también a sus características particulares al ser derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) que les confiere una porosidad alta, buen drenaje y una gran capacidad de almacenar agua.



**Figura 16.** Variación de las actividades enzimáticas en suelos quemados de las localidades de Florida (secano interior), el Valle Central (Depresión intermedia) y Precordillera Andina.

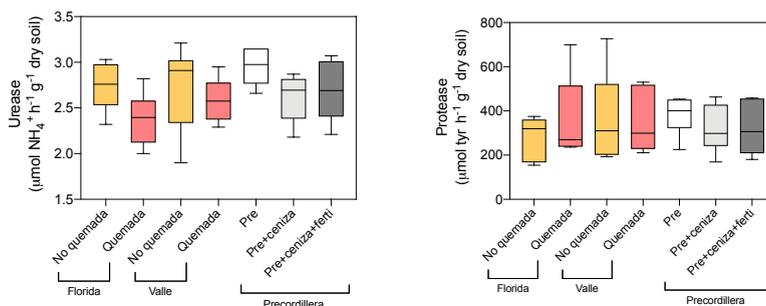
Nota: En estas mismas localidades se tomaron muestras de suelo que no fueron afectados por los incendios. Pre= suelo control sin quema con rastrojo de cultivo de trigo comercial; Pre+ cenizas= cultivo de trigo comercial quemado por incendio; Pre+ cenizas +fertilización = rastrojo de trigo comercial con quema controlada.

Un resultado inesperado es el incremento de la actividad de la enzima fosfatasa ácida responsable de movilizar el fósforo desde moléculas orgánicas, contribuyendo a su biodisponibilidad. Esta actividad enzimática incrementó en los suelos expuestos a los incendios tanto en la zona del Valle central como de la Cordillera de la Costa (Florida) (Figura 16).

En los suelos del Valle central, los resultados de la Figura 16 permiten observar que el impacto del fuego fue mayor en las actividades enzimáticas que el producido en los suelos de Florida (Cordillera de la Costa o Secano interior). Esta observación nos sugiere una menor capacidad tampón o buffer de los suelos del Valle central ante el impacto de los incendios, lo que obliga a tomar medidas post-incendio como

fertilización artificial en el momento de retomar la actividad agrícola, o adición de materia orgánica a modo de cobertura para estimular los procesos biológicos de estos suelos. Se debe recordar que la fertilidad a largo plazo de los suelos depende en gran medida de la biodiversidad y actividad biológica de los mismos.

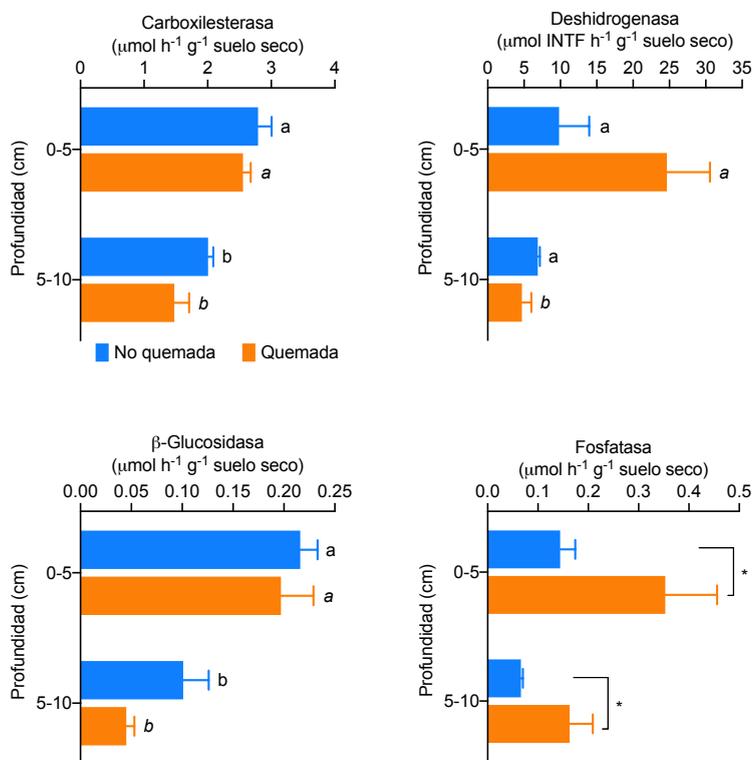
Sin embargo, la respuesta de las enzimas relacionadas con el ciclo del nitrógeno, las actividades ureasa y proteasa, no sufrieron variaciones entre los suelos quemados y los suelos de referencia o control (Figura 17).



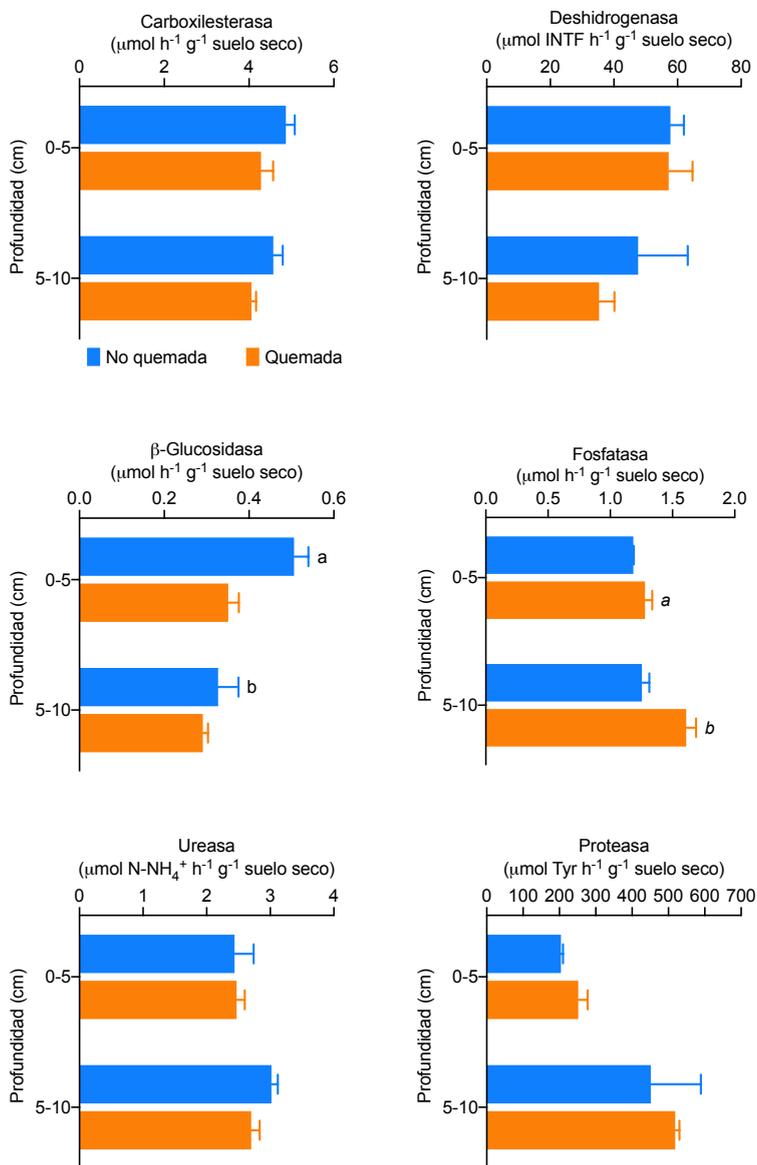
**Figura 17.** Variación de las actividades enzimáticas relacionadas con el ciclo del nitrógeno en suelos quemados de las localidades de Florida (Cordillera de la costa o Secano interior), el Valle central (Depresión intermedia) y Precordillera Andina.

La medida de las actividades enzimáticas con la profundidad del suelo, nos permitió descubrir que, si bien la actividad disminuyó con la profundidad del suelo (Figura 18), los suelos quemados tuvieron una actividad fosfatasa ácida mayor en superficie (0-5 cm) respecto a aquella medida en profundidad (5-10 cm). Esta similar tendencia en la enzima deshidrogenasa sugiere que son los microorganismos, y no solo la presencia de enzimas extracelulares ligadas a la materia orgánica del suelo, los responsables de ese incremento significativo de la fosfatasa ácida en la superficie y profundidad de los suelos quemados de Florida (Cordillera de la Costa o Secano interior).

La actividad deshidrogenasa es comúnmente tomada como una medida de actividad microbiana del suelo porque su medida depende de la presencia en el suelo de microorganismos vivos (bacterias, hongos, protozoos, etc.).



**Figura 18.** Variación de las actividades enzimáticas en el perfil de los suelos quemados y suelos de referencia en la localidad de Florida (Cordillera de la Costa o Secano interior).



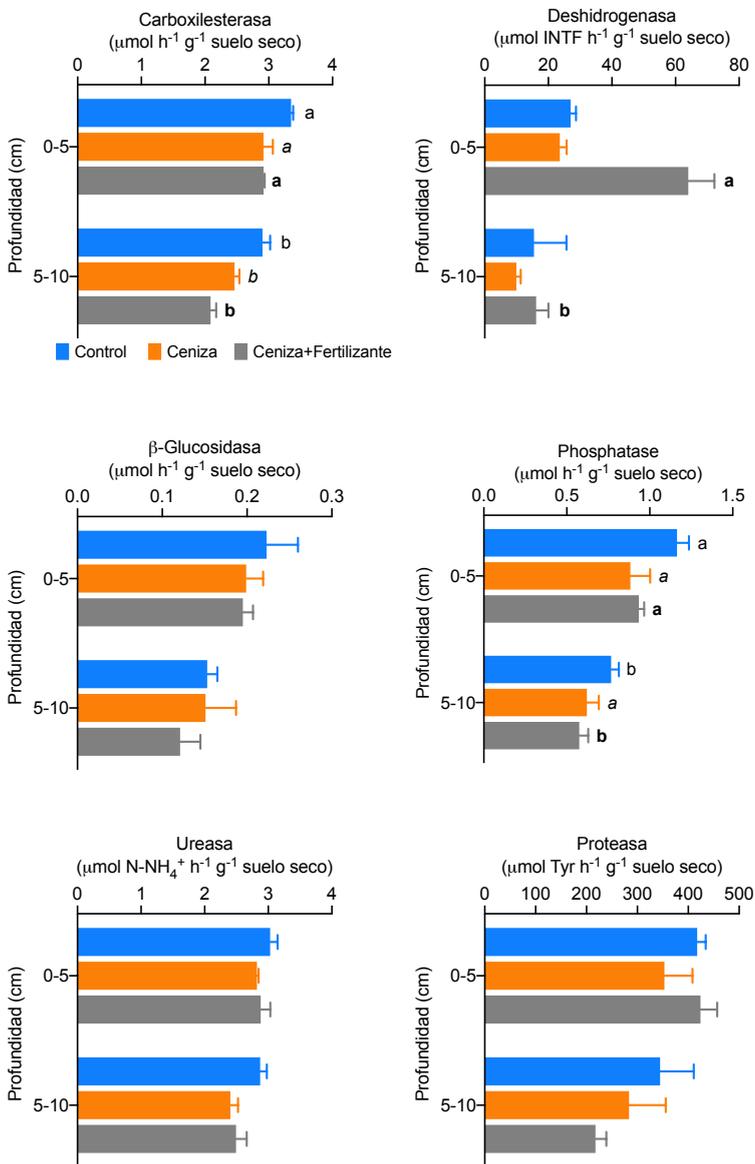
**Figura 19.** Variación de las actividades enzimáticas en el perfil de los suelos quemados y suelos de referencia en el Valle Central.

Los perfiles enzimáticos de los suelos del Valle Central o Depresión intermedia (Figura 19), muestran una tendencia ligeramente diferente a los perfiles de los suelos de Florida (Cordillera de la Costa o Secano interior), incluso, las actividades fosfatasa y aquellas relacionadas con el ciclo del N (proteasa y ureasa) no variaron en el perfil del suelo o incrementaron en las capas más profundas. No se detectaron diferencias significativas entre las actividades enzimáticas de los suelos quemados y los suelos controles.

Para las evaluaciones de Precordillera Andina (Figura 20), la deshidrogenasa incrementó de manera significativa en ambas profundidades exploradas (0-5 y 5-10cm) para el manejo de quema controlada (ceniza+fertilización), esto puede deberse a que las temperaturas del fuego posiblemente no alcanzaron valores tan elevados para inhibir la actividad de esta enzima.

En general las demás enzimas se mantuvieron sin variaciones significativas y el estrato inferior (5-10 cm) manifestó menor actividad que los primeros 5 cm de profundidad.

En la Precordillera Andina, la tendencia de las actividades enzimáticas es similar a las localidades anteriores, con las actividades mayores en la superficie del suelo independientemente de si el suelo no fue afectado por los incendios (control) o si fue quemado.



**Figura 20.** Variación de las actividades enzimáticas en el perfil de los suelos de Precordillera Andina.

A modo de conclusión, en general, las actividades enzimáticas fueron superiores en los suelos del Valle Central (Depresión intermedia) respecto a aquellas de los suelos de la comuna de Florida (Cordillera de la Costa o Secano interior) y de la Precordillera Andina.

La actividad enzimática de la fosfatasa incrementó en los suelos expuestos a los incendios tanto en la zona del Valle Central como de la Cordillera de la Costa (Secano interior). Se reportó una menor capacidad tampón o buffer de los suelos del Valle Central ante el impacto de los incendios.

Los datos recomiendan el análisis de la actividad de la deshidrogenasa y de, al menos, una actividad enzimática relacionada con los diferentes ciclos de nutrientes para obtener un cuadro general de la evolución post-incendio de los suelos afectados por este estrés físico.

### 6.4.3 Bibliografía

- Adkins, J., Sanderman, J., Miesel, J., 2019. Soil carbon pools and fluxes vary across a burn severity gradient three years after wildfire in Sierra Nevada mixed-conifer forest. *Geoderma* 333, 10-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.009>
- Alef, K., Nannipieri, P. (Eds), 1995. *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, London.
- Armas-Herrera, CM, Martí, C., Badía, D., Ortiz-Perpiñá, O., Girona-García, A., Porta, J., 2016. Immediate effects of prescribed burning in the Central Pyrenees on the amount and stability of topsoil organic matter. *Catena* 147, 238-244. <https://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.016>
- Di Rienzo, JA. , Casanoves, F. , Balzarini, MG, Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, CW, 2011. *InfoStat* (version estudiante 2018) {software}. Universidad Nacional de Córdoba. <https://www.infostat.com.ar/>
- Fernández-García, V., Miesel, J., Baezac, MJ, Marcos E., Calvo L., 2019. Wildfire effects on soil properties in fire-prone pine ecosystems: Indicators of burn severity legacy over the medium term after fire. *Applied Soil Ecology* 135, 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.12.002>
- Girona-García, A., Badía-Villas, D., Martí-Dalmau, C., Ortiz-Perpiñá, O., Mora, JL, Armas- Herrera, CM., 2018. Effects of prescribed fire for pasture management on soil organic matter and biological properties: A 1-year study case in the Central Pyrenees. *Science of the Total Environment* 618, 1079-1087. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.127>

- Jordán, A., Zavala, LM, González, FA, Bárcenas-Moreno G., Mataix-Solera, J., 2010. Repelencia al agua en suelos afectados por incendios; métodos sencillos de determinación e interpretación, en: Cerdà, A., Jordan, A. (Eds.), Actualización de métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales. Valencia: Càtedra de Divulgació de la Ciència. Universitat de València. FUEGORED. págs. 145 - 183
- Knelman, JE, Graham, EB, Ferrenberg, S., Lecoivre, A., Labrado, A., Darcy, JL, Nemergut, DR, Schmidt, SK, 2017. Rapid shifts in soil nutrients and decomposition enzyme activity in early succession following forest fire. *Forests* 8, 347-359. <https://doi.org/10.3390/f8090347>
- Parro, K., Köster, K., Jöggiste, K., Seglinš, K., Sims, A., Stanturfa, JA, Metslaid, M., 2019. Impact of post-fire management on soil respiration, carbon and nitrogen content in a managed hemiboreal forest. *Journal of Environmental Management* 233, 371-377. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.050>
- Popova, Inna & Deng, Shiping. (2010). A high-throughput microplate assay for simultaneous colorimetric quantification of multiple enzyme activities in soil. *Applied Soil Ecology* . 45. 315- 318. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.04.004>
- Rundel, PW., Arroyo, MTK, Cowling, RM, Keeley, JE, Lamont, BB, Pausas, JG, Vargas, P., 2018. Fire and plant diversification in Mediterranean-climate regions. *Frontiers in Plant Science* 9, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00851>
- Sadzawska R., A., Carrasco R., MA, Grez Z., R., Mora G., ML, Flores P., H., Neaman, A., 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas INIA N° 34, Santiago, Chile, 164p.
- Sánchez-Hernández, J.C., J. Notario del Pino, and J. Domínguez. 2015. Earthworm-induced carboxylesterase activity in soil: Assessing the potential for detoxification and monitoring organophosphorus pesticides. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 122:303-312
- Saranya, KRL, Sudhakar Reddy, CS, Prasada Rao, PVV., 2016. Estimating carbon emissions from forest fires over a decade in Similipal Biosphere Reserve, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 4, 61 -67. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2016.06.001>
- Sawyer, R., Bradstock, R., Bedward, M., Morrison, RJ, 2018. Soil carbon in Australian fire-prone forests determined by climate more than fire regimes. *Science of the Total Environment* 639, 526–537. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.169>
- Schinner, F., Öhlinger, R., Kandeler, E., Margesin, R. (1996). *Methods in Soil Biology*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York.

- Von Mersi, W., Schinner, F. An improved and accurate method for determining the dehydrogenase activity of soils with idonitrotetrazolium chloride. *Biol Fertil Soils* 11, 216– 220 (1991).
- Weninger, T., Filipović, V., Mešić, M., Clothier, B., Filipović, L., 2019. Estimating the extent of fire induced soil water repellency in Mediterranean environment. *Geoderma* 338, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.008>
- Zagal, E., Muñoz, C., Quiroz, M., Córdova, C., 2009. Sensitivity of early indicators for evaluating quality changes in soil organic matter. *Geoderma* 151, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.004>
- Zheng, W., Morris, EK, Lehmann, A., Rillig, MC, 2016. Interplay of soil water repellency, soil aggregation and organic carbon. A meta-analysis. *Geoderma* 283, 39–47. <https://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.025>

## 6.5. Caracterización compost utilizado en ensayos

Parámetro	Unidad	Valor
Materia Orgánica	%	> 24
pH	(1:10)	7 - 8
Conductividad eléctrica (CE)	dS/m (1:10)	< 3
Humedad	%	> 24
Nitrógeno	% (N total)	1,4
Fósforo	% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,6
Potasio	% K <sub>2</sub> O	0,5
Calcio	% CaO	6
Magnesio	% MgO	0,5
Relación C/N		< 12
Densidad aparente	kg/m <sup>3</sup>	800
Arsénico (As)	mg/kg	5
Cadmio(Cd)	mg/kg	1,5
Mercurio (Hg)	mg/kg	1
Plomo (Pb)	mg/kg	20
Coliformes Fecales	NMP/g	< 1000
Salmonella	NMP/4g	Ausente





**MANUAL DE EVALUACIÓN Y  
RESTAURACIÓN AGRO-ECOLÓGICA  
DE SUELOS DE USO AGROPECUARIOS  
AFECTADOS POR INCENDIOS**



Descarga la versión pdf en:  
[www.udt.cl/restauracion-agro-ecologica](http://www.udt.cl/restauracion-agro-ecologica)