

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**CAMBIOS EN PROPIEDADES EDAFO-FÍSICAS DE UN ANDISOL TRAS
DOCE AÑOS DE APLICACIÓN DE PURINES DE LECHERÍA**

POR

JAIME ANDRÉS MANRÍQUEZ GODOY

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN – CHILE
2023**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CAMBIOS EN PROPIEDADES EDAFO-FÍSICAS DE UN ANDISOL TRAS
DOCE AÑOS DE APLICACIÓN DE PURINES DE LECHERÍA**

POR

JAIME ANDRÉS MANRÍQUEZ GODOY

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN – CHILE
2023**

Aprobada por:

Profesor Asociado, Marco Sandoval E.
Ing. Agrónomo, Mg.Cs. Dr. Cs Ambientales

Guía

Profesor Asistente, Christian Guajardo E.
Ing. Agrónomo, Dr. En Ingeniería Agraria y
Recursos Naturales

Asesor

Profesor Asistente, Walter Valdivia C.
Ing. Agrónomo, Dr. En Ingeniería. Agrícola

Asesor

Profesor Asociado, Guillermo Wells M.
Ing. Agrónomo, Mg. Cs.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen.....	1
Summary.....	1
Introducción.....	2
Materiales y Métodos.....	4
Resultados y Discusión.....	8
Conclusiones.....	6
Referencias.....	16
Anexos.....	21

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1	Identificación de los tratamientos evaluados con distintos años de aplicación de purines.....	5
Tabla 2	Valores medios de los parámetros materia orgánica (MO), densidad aparente (Da), porosidad total (Pt), macroagregados (MAC), microagregados (MIC) y humedad aprovechable (HA) evaluados en el horizonte genético A, para los diferentes tratamientos en años de aplicación de purines.....	9
Tabla 3	Valores medios de los parámetros materia orgánica (MO), densidad aparente (Da), porosidad total (Pt), macroagregados (MAC), microagregados (MIC) y humedad aprovechable (HA) evaluados en el horizonte genético B, para los diferentes tratamientos en años de aplicación de purines.....	10
Tabla 4	Índice de calidad física de suelos (ICFS) total, de acuerdo a los parámetros físicos evaluados en el horizonte genético A, para los diferentes años de aplicación de purines.....	13
Tabla 5	Índice de calidad física de suelos (ICFS) total, de acuerdo a los parámetros físicos evaluados en el horizonte genético B, para los diferentes años de aplicación de purines.....	14
Tabla 6	Correlación de Pearson entre materia orgánica (%) y otras variables estudiadas para el horizonte genético A.....	15
Tabla 7	Correlación de Pearson entre materia orgánica (%) y otras variables estudiadas para el horizonte genético B.....	15

	Página
Tabla 8 Niveles de referencia (NR) de materia orgánica (%) para suelos derivados de cenizas volcánicas y su índice de calidad física de suelos (ICFS).....	21
Tabla 9 Niveles de referencia (NR) e índice de calidad física de suelos (ICFS) para densidad aparente (Da) y porosidad total (Pt) para suelos derivados de cenizas volcánicas.....	21
Tabla 10 Niveles de referencia (NR) de macroagregados (MAC) y su índice de calidad física de suelos (ICFS).....	22
Tabla 11 Niveles de referencia (NR) de microagregados (MIC) y su índice de calidad física de suelos (ICFS).....	22
Tabla 12 Niveles de referencia de altura de agua aprovechable (AWP) y su índice de calidad física de suelos (ICFS).....	22
Tabla 13 Índice de calidad física de suelos (ICFS) Total, interpretación según su nivel y recomendación general (adaptada).....	23

CAMBIOS EN PROPIEDADES EDAFO-FÍSICAS DE UN ANDISOL DESPUÉS DE DOCE AÑOS DE APLICACIÓN DE PURINES DE LECHERÍA

CHANGES IN SOIL-PHYSICAL PROPERTIES OF AN ANDISOL AFTER TWELVE YEARS OF DAIRY SLURRY APPLICATION

Palabras claves adicionales: Residuo orgánico, Reutilización, Porosidad.

RESUMEN

El sistema intensivo de producción de leche en Chile genera diariamente una gran cantidad de desechos orgánicos provenientes de las salas de ordeña, su inadecuado almacenamiento y/o mal manejo repercute negativamente en el ambiente. Incorporar materia orgánica al suelo tiene efectos favorables sobre las propiedades físicas de los suelos. El objetivo de este estudio fue investigar las propiedades físicas de un suelo Andisol tratado con doce años de aplicaciones de purines. Para ello se evaluó los indicadores de calidad física de suelos y los resultados se interpretaron con el índice de calidad física de suelos (ICFS). Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, con seis tratamientos (2, 4, 6, 8, 10 y 12 años de aplicación de purines) además de un control sin aplicación de purines) con cuatro repeticiones, la unidad experimental correspondió a parcelas de 200 m * 200 m. El estudio se realizó en praderas permanentes compuestas por *Lolium perenne L.* y *Trifolium repens L.*, la dosis de aplicación fue de 150.000 L ha⁻¹ año⁻¹. En lo que se refiere a las propiedades físicas del suelo, en el horizonte A, la aplicación de purines presentó aumentos de materia orgánica hasta los seis años; Entre el cuarto y décimo año favoreció la densidad aparente y la porosidad total. En ambos horizontes, favoreció la humedad aprovechable en las parcelas que recibieron ocho años de aplicación. La orgánica presente en el horizonte A se correlacionó positivamente con la porosidad total y humedad aprovechable.

SUMMARY

The intensive milk production system in Chile generates a large amount of organic

waste from milking parlors on a daily basis, and it is inadequate storage and/or inadequate management has a negative impact on the environment. Incorporating organic matter has favorable effects on the physical properties of soils. The objective of this study was to investigate the physical properties of an Andisol soil treated with twelve years of slurry applications. For this purpose, soil physical quality indicators were evaluated and the results were interpreted with the soil physical quality index. A completely randomized experimental design was used, with six treatments (2, 4, 6, 8, 10 and 12 years of slurry application) plus a control (without slurry application) with four replications, the experimental unit corresponded to plots of 200 m * 200 m. The study was carried out in permanent pastures composed of *Lolium perenne L.* and *Trifolium repens L.*, the application rate was 150.000 L ha⁻¹ year⁻¹. Regarding the physical properties of the soil, in the A horizon, the application of slurry increased organic matter up to six years; between the fourth and tenth year, it favored bulk density and total porosity. In both horizons, it favored available water capacity in the plots that received eight years of application. The organic matter present in the A horizon was positively correlated with the soil porosity and available water capacity.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se proyecta que la producción y consumo de productos pecuarios, dentro de los que se encuentran los lácteos, siga en aumento. En Chile, el año 2021 se recibieron 2.465 millones de litros, el mayor aporte (92 %) del total de leche cruda recibida provino de la industria láctea mayor. Las regiones de Los Lagos y Los Ríos concentraron la mayor masa ganadera destinada a la producción láctea, siendo las regiones de mayor relevancia por su aporte en el total de litros recibidos (Peralta, 2022).

Los suelos de origen volcánico tienen relevancia en Chile, ya que parte importante de la actividad agrícola y ganadera se desarrolla sobre ellos (Pizarro, 2000). Estos suelos representan el 60 % del total de hectáreas arables que el país dispone. La superficie utilizada en la actividad pecuaria de nuestro país, se dispone principalmente sobre suelos de origen volcánico (Besoain, 1985). Dentro de los suelos chilenos provenientes de cenizas volcánicas se encuentran los Andisoles

(Pizarro, 2000). Estos suelos presentan un contenido de materia orgánica (MO) alcanza valores de 12 % en el horizonte A y 5 % en el horizonte B; además son caracterizados por presentar una baja densidad aparente ($0,6$ a $0,9 \text{ g cm}^{-3}$) (Stolpe, 2006). Este orden de suelo presenta una de las mayores capacidades de acumular Carbono Orgánico (CO), que es el principal elemento que forma parte de la materia orgánica del suelo (Eswaran *et al.*, 1993). El CO afecta diversas propiedades físicas como la distribución del espacio poroso y la agregación del suelo (Martínez *et al.*, 2008). El orden jerárquico establecido en la estructura del suelo acepta la existencia de macroagregados ($\geq 0,25 \text{ mm}$) y microagregados ($< 0,25 \text{ mm}$). Los primeros son sensibles a las variaciones en el contenido de materia orgánica y prácticas de manejo (Bronick y Lal, 2005).

El actual método que utiliza el sistema intensivo de producción de leche en Chile, confina al rebaño gran parte de su periodo productivo y utiliza para su alimentación una mayor proporción con concentrados, heno y ensilaje de maíz. Esto conlleva a la acumulación de residuos, entre ellos, volúmenes de purines o efluentes (Salazar *et al.*, 2007). Dumont *et al.*, 2003 mencionan que las aguas de lluvia y lavado son el principal componente de los purines y una menor proporción correspondería a fecas y orina. La materia seca presente en los purines varía entre un 1,9 – 3,1 %, sin embargo, el contenido de materia orgánica (MO) presente en el residuo seco representa un 60% (Aguilera *et al.*, 1995). Al respecto, Salazar *et al.*, 2003 mencionan que un bovino podría generar entre 34 - 260 L purín vaca⁻¹, variando según prácticas y zona climática. Un mal manejo y/o mal almacenamiento puede repercutir negativamente en el medioambiente (Dumont *et al.*, 2003; CPL, 2012; Pedraza, 1996).

Un manejo de estos residuos, es la incorporación de purines al suelo agrícola, al realizar esto se busca disponer eficientemente los desechos, reciclar nutrientes e incorporar MO al suelo (Candía *et al.*, 2012; Salazar *et al.*, 2007; Martínez-Lagos *et al.*, 2014). La aplicación de purines en el predio debe seguir los requisitos de calidad del agua establecida por la Norma Chilena NCh 1333.Of 78 (INN, 1978). Por otra parte, los predios que no aplican purines al suelo y eliminan estos residuos a cauces de aguas, deben cumplir la norma de emisión para la regulación de contaminantes

asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales (D.S. N°90 / 2000) y/o la norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas (D.S. N°46 / 02).

La importancia de los purines como abono, desde el punto de vista edafológico, está dada por la cantidad de MO que aporta al suelo (Aguilera *et al.*, 1995). Diversos estudios respaldan que las adiciones de largo plazo (Hati *et al.*, 2007; Bhogal *et al.*, 2009; Hemmat *et al.*, 2010; Eche *et al.*, 2013) y corto plazo de MO al suelo modifican propiedades físicas de los mismos (Acevedo *et al.*, 2014). Posterior a la aplicación de abonos agrícolas, es de esperar aumentos en la agregación, aumentos en la porosidad total (Pt), mayor capacidad de retención de agua y una disminución de la densidad aparente (Da) del suelo (Haynes y Naidu, 1998; Bhogal *et al.*, 2009).

Por las razones expuestas anteriormente, se hace necesario almacenar los purines para posteriormente ser aplicados a los suelos, como herramienta para reutilizar desechos, evitando así una fuente de contaminación ambiental y mejorando la calidad del suelo (Bhogal *et al.*, 2009; Demanet *et al.*, 1999).

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, se planteó como hipótesis del estudio que la aplicación de purines modifica las propiedades físicas en un suelo Andisol. El objetivo general fue caracterizar las propiedades físicas de un suelo Andisol tratado con aplicaciones de purines. Los objetivos específicos se definieron como (1) Determinar el efecto en los parámetros físicos de un suelo Andisol después de 2, 4, 6, 8, 10 y 12 años de aplicación de purines. (2) Evaluar el efecto de los distintos tratamientos en la calidad física del suelo mediante un índice de calidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se emplaza en las coordenadas 36°33'17" S y 71°52'45" O, en la Estación Experimental Pecuaria "Marcelo Tima" de la Universidad de Concepción, Comuna de Coihueco, Región de Ñuble. Se encuentra en la zona geográfica de la depresión central y presenta un clima templado mediterráneo, la temperatura anual en la Región es de 13,9 °C, con una mínima de 3 °C durante julio y una máxima de 28,6 °C promedio en el mes de enero. Pluviometría media anual de 1.270 mm (Pozo *et al.*, 2014).

El suelo corresponde a la Serie Arrayán (Humic Haploxerands) (Stolpe, 2006). El sitio experimental presenta características de texturas medias con dominancia de la clase textural franco limosa, bien estructurado en superficie, con abundante porosidad asociada a un buen arraigamiento en todo el pedón. Corresponde a una topografía plana o casi plana, tiene una permeabilidad moderada y un escurrimiento superficial lento (Santis, 2005).

El experimento consistió en siete parcelas experimentales ubicadas en la Estación Experimental Pecuaria Marcelo Tima Péndola. Cada parcela tiene una superficie aproximada de ocho hectáreas, sin embargo, para el experimento fueron seleccionadas cuatro hectáreas centrales dada su homogeneidad en la aplicación de los purines, de la profundidad del suelo y de su composición botánica. Para el experimento se consideraron siete tratamientos (Tabla 1).

Tabla 1. Identificación de los tratamientos evaluados con distintos años de aplicación de purines.

Tratamientos	Horizontes genéticos	Nomenclatura Tratamientos
Control sin aplicación	A y B	T0
Con 2 años de aplicación	A y B	T2
Con 4 años de aplicación	A y B	T4
Con 6 años de aplicación	A y B	T6
Con 8 años de aplicación	A y B	T8
Con 10 años de aplicación	A y B	T10
Con 12 años de aplicación	A y B	T12

Los purines utilizados en este experimento fueron acumulados en un pozo, con capacidad de 15.000 litros. La dosis aplicada fue de 150.000 L ha⁻¹ año⁻¹, mediante de un carro con capacidad de 5000 litros. La frecuencia promedio de aplicación fue de 15 días. La composición botánica de las parcelas experimentales corresponde a

praderas permanentes compuestas por *Lolium perenne L.* y *Trifolium repens L.*, la fertilización de mantención de las praderas se realiza anualmente a base de fertilizantes sintéticos y la dosis que se aplica es de 46 kg ha⁻¹ de nitrógeno (N), 120 kg ha⁻¹ de fósforo (P) y 60 kg ha⁻¹ de potasio (K).

Para la toma de muestras se hizo una calicata por hectarea. El objetivo de las calicatas fue describir los horizontes genéticos, definir la profundidad y características morfológicas, permitiendo diferenciar cada horizonte pedogenético (A y B). Posteriormente, se procedió a tomar 25 submuestras, mediante un modelo en zig - zag, utilizando una barrena cilíndrica para luego conformar una muestra compuesta por hectarea y por horizonte pedogenetico. En consecuencia, cada tratamiento consideró ocho muestras compuestas. Fueron dispuestas en envases de polietileno y luego enviadas al Departamento de Suelos y Recursos Naturales de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción.

La agregación del suelo se determinó utilizando 100 g de suelo seco (Sandoval *et al.*, 2012)., previamente tamizado por un tamiz 4,0 mm, la separación de los diferentes tamaños de agregados se realizó mediante tamizado en húmedo siguiendo el procedimiento descrito por Yoder (1936). Para ello se usaron tamices de diferentes diámetros (2; 1; 0,5; 0,25; 0,1; 0,05 mm), los cuales se ordenaron de mayor a menor. Los tamices se sumergieron en agua y se agitaron a 25 ciclos min⁻¹ por 15 min. El porcentaje de agregados por tamaño se calculó a partir de la masa seca (g) de los agregados que quedaron en cada tamiz.

Los resultados se expresaron en porcentajes de agregados, el contenido de macroagregados (MAC) se consideraron aquellos $\geq 0,25$ mm y microagregados (MIC) a los $< 0,25$ mm.

Densidad aparente (Da) se determinó mediante el método del cilindro y se calculó como el cociente entre la masa de suelo seco a 105 °C (Mss) y el volumen total (Vt) que ocupa dicha masa de suelo (Sandoval *et al.*, 2012).

Densidad real (Dr) se determinó mediante el metodo del picnómetro siguiendo la metodología descrita por (Sandoval *et al.*, 2012).

Porosidad total (Pt) se procedio a determinar mediante la fórmula:

$$EP = [1 - (Da/Dr)] * 100 \quad [\%]$$

Donde:

Da = Densidad aparente del suelo (g cm^{-3}).

Dr = Densidad real del suelo (g cm^{-3}).

(Sandoval *et al.*, 2012).

Humedad aprovechable (HA) se realizaron curvas de retención de humedad a 1/3 y 15 atmósferas, para la determinación de la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). A partir de esa información se determinó la HA, con la siguiente fórmula:

$$HA = (CC - PMP) / 100 * Da * z$$

Dónde:

HA = altura de agua (cm)

CC = capacidad de campo (%hbss)

PMP = punto de marchitez permanente (%hbss)

Da = densidad aparente del suelo (g cm^{-3})

z = profundidad de suelo involucrada (cm)

(Sandoval *et al.*, 2012).

Textura del suelo se determinó por medio del método del hidrómetro de Bouyoucos, siguiendo la metodología establecida por Sandoval *et al.*, 2012.

Materia orgánica del suelo se obtuvo por la determinación del contenido (CO) mediante oxidación con dicromato en medio ácido y determinación colorimétrica del cromato reducido (Sadzawka *et al.*, 2006).

Para evaluar calidad de los suelos sometidos a aplicaciones de purines, se utilizó el modelo índice de calidad de suelos (ICS) empleado por (Amacher *et al.*, 2007; Sandoval *et al.*, 2020) adaptado a suelos de origen volcánico. Es importante mencionar que se utilizaron los siguientes parámetros: MO, Da, Pt, MAC y MIC con sus respectivos valores umbrales, interpretación e índice asociado. Una vez obtenidos todos los valores de índice de calidad física de suelos (ICFS) correspondientes a cada parámetro evaluado, se procedió a realizar la sumatoria de los mismos para obtener un ICFS total, para posteriormente ser interpretado según la Tabla 13 adaptada. Dicho cálculo permitió establecer el estado del suelo a nivel físico según el tratamiento que recibió. La fórmula para el cálculo índice de

calidad física de suelo total sería:

$$\text{ICFS total} = \text{ICFS (MO)} + \text{ICFS (Da)} + \text{ICFS (Pt)} + \text{ICFS (MAC)} + \text{ICFS (MIC)} + \text{ICFS (HA)}$$

El Diseño experimental se ajustó a un completo al azar con distribución de parcela, el cual consistió en seis tratamientos, además de un control (sin aplicación de purines), con un total de cuatro repeticiones por tratamiento por horizonte genético, la unidad experimental corresponde a parcelas de 200 m * 200 m.

La información obtenida se sometió a un análisis de varianza (ANDEVA), y las medias se analizaron con el test Tukey a un 95 % de confianza. Además, los datos fueron sometidos al supuesto de normalidad con el test de Shapiro-Wilks. Para el análisis de los datos se utilizó el programa estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Considerando que los horizontes genéticos son consecuencia de la edafogénesis, se evaluó cada horizonte por separado (horizonte A y horizonte B). Se establecieron las profundidades de cada horizonte; horizonte A de 0 - 14 cm y horizonte B de 14 - 61 cm. La Tabla 2 y Tabla 3 indican los resultados para los parámetros evaluados, de acuerdo a los distintos tratamientos de aplicación de purines y horizontes.

Los niveles más altos de acumulación de MO se presentaron en el horizonte A, presentando en promedio un 40 % más de MO que el horizonte B. Esto se puede atribuir a la acumulación de MO en los primeros centímetros del perfil producto de las aplicaciones de purines y a la mayor masa vegetal de la pradera que se concentra en este primer horizonte. Venegas (2008) reporta similares observaciones en un suelo Andisol de la serie Osorno, donde comenta que la concentración de MO va disminuyendo conforme aumenta la profundidad del perfil de suelo. En general, todos los tratamientos en el horizonte B presentaron valores superiores a los descritos por Stolpe (2006) para este tipo de suelos, pero sin aplicación de purines de lechería.

El contenido de MO mostró diferencias estadísticas ($P \leq 0,05$) entre todos los tratamientos (Tabla 2 y Tabla 3). Se observa que, en ambos horizontes, el contenido

de MO va aumentando (a excepción de T4) en la medida que los tratamientos aumentan los años de aplicación de purines; hasta T6 en el horizonte A y hasta T8 en el horizonte B; luego se presenta una disminución en los valores de los tratamientos restantes. Esta tendencia podría ser explicada por una disminución en el aporte de CO por parte de la pradera; Puesto que sufre una degradación después de 10 años (Soto, 1996). En el horizonte A, el contenido de MO presente en la parcela que recibió doce años de aplicación de purines (T12) fue significativamente menor ($P \leq 0,05$) al control.

Tabla 2. Valores medios de los parámetros materia orgánica (MO), densidad aparente (Da), porosidad total (Pt), macroagregados (MAC), microagregados (MIC) y humedad aprovechable (HA) evaluados en el horizonte genético A, para los diferentes tratamientos en años de aplicación de purines.

Tratamiento*	MO %	Da Mg m ⁻³	Pt %	MAC %	MIC %	HA cm
T0	11,10 c	0,76 b	70,56 b	84,34 e	0,55 c	2,28 b c
T2	11,95 e	0,80 b	69,14 b	92,26 f	0,05 a	2,40 c d
T4	10,08 a	0,65 a	74,91 c	95,51 g	0,18 b	2,15 b
T6	16,00 g	0,65 a	74,81 c	79,40 b	0,66 d	2,31 c
T8	15,57 f	0,63 a	75,29 c	76,44 a	0,20 b	2,60 e
T10	11,39 d	0,63 a	75,58 c	82,37 d	0,86 e	1,97 a
T12	10,97 b	0,94 c	63,98 a	82,08 c	1,80 f	2,54 d e
DMS	0,04	0,04	1,81	0,04	0,04	0,14
CV (%)	0,16	2,83	1,10	0,02	3,33	2,80

*T0= control sin aplicación de purines; T2= dos años aplicación de purines; T4= cuatro años aplicación de purines; T6= seis años aplicación de purines; T8= ocho años aplicación de purines; T10= diez años aplicación de purines; T12= doce años aplicación de purines. Medias con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba Tukey a un $P \leq 0,05$. DMS= diferencia mínima significativa, CV= coeficiente de variación

En lo que se refiere a la Da, indicador relacionado con la compactación de los suelos, los valores en general son bajos y corresponden a suelo derivados de cenizas volcánicas (Andisoles). Según Fleige *et al.*, 2016, esta clase de suelo presenta valores de $< 0,9 \text{ g cm}^{-3}$. En el horizonte A se observan valores sin

diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre los tratamientos T4, T6, T8 y T10 ($0,64 \pm 0,01 \text{ Mg m}^{-3}$), sin embargo, las medias son un 0,12 % inferior al tratamiento control T0. Esta diferencia puede ser considerada como favorable dado que un menor valor D_a indica menor compactación y una estructura más favorable (Sandoval-Estrada *et al.*, 2008). En esta misma profundidad, se registra un valor significativamente mayor ($P \leq 0,05$) de D_a en el tratamiento con doce años de aplicación de purines T12. En el horizonte B, los valores variaron desde 0,78 a $0,95 \text{ Mg m}^{-3}$. El menor valor de D_a se presentó en las parcelas de tratamientos control T0 y T6, por lo que se observa que en general la aplicación de purines aumentó la D_a a esta profundidad.

Tabla 3. Valores medios de los parámetros materia orgánica (MO), densidad aparente (D_a), porosidad total (Pt), macroagregados (MAC), microagregados (MIC) y humedad aprovechable (HA) evaluados en el horizonte genético B, para los diferentes tratamientos en años de aplicación de purines.

Tratamiento*	MO %	D_a Mg m^{-3}	Pt %	MAC %	MIC %	HA cm
T0	7,01 b	0,78 a	70,66 c	84,35 c	2,25 e	9,79 b c
T2	9,69 d	0,92 c	65,19 a	94,68 g	0,34 b	9,52 b
T4	6,69 a	0,95 c	64,25 a	50,86 a	2,42 f	10,75 d
T6	9,74 e	0,80 a	69,91 c	89,92 e	0,52 c	9,67 b c
T8	10,09 f	0,92 c	65,28 a	88,68 d	3,18 g	12,35 e
T10	9,67 d	0,84 b	68,21 b	82,07 b	1,62 d	9,95 c
T12	8,57 c	0,94 c	64,62 a	94,13 f	0,25 a	8,86 a
DMS	0,03	0,03	1,21	0,03	0,03	0,38
CV (%)	0,15	1,54	0,80	0,02	0,90	1,64

*T0= control sin aplicación de purines; T2= dos años aplicación de purines; T4= cuatro años aplicación de purines; T6= seis años aplicación de purines; T8= ocho años aplicación de purines; T10= diez años aplicación de purines; T12= doce años aplicación de purines. Medias con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba Tukey a un $P \leq 0,05$. DMS= diferencia mínima significativa, CV= coeficiente de variación

Resultados reportados por Rassol *et al.*, 2008 tras treinta y dos años de aplicación de estiércol en un suelo franco arenoso, indican que el mayor efecto sobre D_a se

observa de los 0 a 30 centímetros, que a mayor profundidad (30 - 60 cm), sin embargo, registran decrementos en los valores de D_a en todas las profundidades respecto al control sin aplicación de estiércol de corral.

Los valores más altos de P_t se presentaron en el horizonte A (Tabla 2 y Tabla 3). Considerando la composición botánica de la pradera, este efecto puede deberse a que exista a una mayor presencia de raíces en la parte superior del suelo (Aedo, 1996; Sandoval-Estrada *et al.*, 2008). Se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre los distintos tratamientos, en ambos horizontes. Los valores fluctúan entre 63,98 - 75,58 % de porosidad en el horizonte A. Respecto al horizonte B, los valores variaron entre 63,70 - 69,86 %. Estos valores son concordantes con lo expuesto por Vial y Sandoval (2015) en praderas de un suelo Andisol en la Región de Aysén. En el horizonte A, se observó una porosidad significativamente ($P \leq 0,05$) mayor en las parcelas que recibieron cuatro, seis, ocho y diez años de aplicación de purines respecto al control T0. Sin embargo, no presentan diferencias estadísticas ($P \leq 0,05$) entre ellos (T4, T6, T8 y T10). De acuerdo a lo expuesto por Alvarez-Sanchez *et al.* (2020) en un suelo de origen volcánico bajo manejo agroecológico, la porosidad del suelo incrementa producto de la adición de abonos orgánicos. El tratamiento T12 en esta misma profundidad, presentó una porosidad significativamente ($P \leq 0,05$) inferior a los demás tratamientos. En el horizonte B, valores significativamente ($P \leq 0,05$) más altos de espacio poroso en la matriz de suelo se observan en T0 y T6, en comparación con los otros tratamientos. En general, a mayor profundidad (14 – 61 cm) la aplicación de purines redujo el espacio poroso del suelo.

Los resultados respecto a los MAC mostraron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre los tratamientos, en ambos horizontes (Tabla 2 y Tabla 3). En el horizonte A los valores fluctuaron entre 76,44 - 95,51 % y entre 50,86 - 94,68 % en el horizonte B. Sandoval *et al.* (2007) reportaron una predominancia en promedio de 67,5 % de MAC en los primeros 10 centímetros de suelo de un suelo Andisol serie Arrayan. En el horizonte A, las parcelas con mayor proporción de MAC fueron las que se encontraron bajo los tratamientos T2 y T4 (92,26 y 95,51 %). En contexto, la parcela que recibió cuatro años de aplicación de purines, presentó el menor contenido de

MO. Lo expuesto anteriormente discrepa con lo reportado por Sandoval-Estrada *et al.* (2010) donde menciona que la aplicación de lodos urbanos en un suelo derivado de cenizas volcánicas aumentaría la proporción de MAC producto del aporte de MO. Por tanto, se infiere que la aplicación de purines en el horizonte A, disminuyó la formación de MAC después del cuarto año de aplicación de purines, presentando valores significativamente ($P \leq 0,05$) inferiores al control T0. Reducir los MAC contribuye a los procesos erosivos de los suelos, considerando además que, los suelos Andisoles en su naturaleza presentan una fragilidad estructural, siendo susceptibles a la erosión y compactación (Sandoval-Estrada *et al.*, 2008).

En cuanto a los MIC los tratamientos muestran diferencias significativas ($P \leq 0,05$) en ambos horizontes genéticos (A y B). Se observa una mayor proporción de MIC en el horizonte B (0,25 – 3,18 %) en comparación con el horizonte A (0,05 – 1,80 %). En el horizonte B se observa que las parcelas que recibieron 10 y 12 años de aplicación de purines presentaron un porcentaje inferior de MIC en comparación con el tratamiento control T0, mientras que el tratamiento T8 evidenció el porcentaje más alto. En contraste, en el horizonte A se produjo un efecto opuesto, los porcentajes más altos de MIC corresponden a los tratamientos T10 y T12, siendo estadísticamente diferentes al tratamiento control T0.

Según se observa en la Tabla 2 y Tabla 3 hubo diferencias significativas ($P \leq 0,05$) de HA los distintos tratamientos en ambos horizontes. Los resultados indican que existe un efecto significativamente ($P \leq 0,05$) positivo en disponibilidad de agua en la parcela con ocho años de aplicación de purines (T8). Coincidentemente, se manifiesta el mismo efecto en ambos horizontes genéticos, ya que, en este tratamiento se presentan los valores más altos en comparación con el tratamiento sin aplicación de purines de lechería. Este aumento en la disponibilidad de agua para la planta en T8 puede tener relación con el contenido de MO (%), según mencionan Bhogal *et al.* (2009) y Salcedo-Pérez *et al.* (2007) los aportes de MO al suelo tendrían la capacidad de modificar favorablemente la capacidad del suelo para almacenar agua disponible para las plantas. En el horizonte B, en la parcela con doce años de aplicación de purines (T12) se observaron valores inferiores al control sin aplicación de purines (T0).

Índice de calidad física de suelos (ICFS)

Las aplicaciones de purines de lechería, según los distintos tratamientos evaluados, en este experimento, no modificaron significativamente la condición de calidad “media” presentada por el tratamiento control T0. Sin embargo, para el horizonte A, se observa una mejora en cuanto a calidad física del suelo desde el sexto al décimo año de aplicación de purines.

Tabla 4. Índice de calidad física de suelos (ICFS) total, de acuerdo a los parámetros físicos evaluados en el horizonte genético A, para los diferentes años de aplicación de purines.

ICFS Total horizonte genético A							
	T0	T2	T4	T6	T8	T10	T12
MO	2*	2	1	2	2	2	1
Da	1	1	2	2	2	2	1
Pt	1	1	1	1	2	2	1
MAC	3	3	2	3	3	3	3
MIC	3	3	3	3	3	3	3
AWP	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
TOTAL	8	8	7	9	10	10	7

MO: materia orgánica; Da: densidad aparente; Pt: porosidad total; MAC: macroagregados; MIC: microagregados; AWP: altura de agua aprovechable o HA. T0= control sin aplicación de purines; T2= dos años aplicación de purines; T4= cuatro años aplicación de purines; T6= seis años aplicación de purines; T8= ocho años aplicación de purines; T10= diez años aplicación de purines; T12= doce años aplicación de purines. *índice de calidad física según niveles de referencia.

La interpretación de los resultados de ICFS total, en el horizonte A sitúan a las que recibieron tratamientos en un nivel “medio”, cabe mencionar que las parcelas que recibieron los tratamientos T6, T8 y T10 obtuvieron los valores ICFS total más altos. Por otra parte, se observa que la parcela con doce años de aplicación de purines presento un valor ICFS total inferior al control T0, sin embargo, se encuentran dentro de la misma categoría; según estos resultados, Sandoval *et al.* (2020) recomiendan establecer praderas con especies que posean raíz pivotante, realizar manejos que aumenten la MO del suelo. También debería considerarse las

evaluaciones de calidad física anuales, especialmente después de los seis años en praderas.

Respecto al horizonte B, todos resultados del ICFS total se interpretan dentro de un nivel “medio”. La ponderación obtenida en la parcela con el tratamiento T8 fue la mayor, en contraste, la ponderación menor se obtuvo bajo el tratamiento T12, coincidentemente al igual que en el horizonte A, se obtuvo un valor ICFS total inferior al control T0. Dado que el suelo a mayor profundidad (14 - 61 cm) no presento valores ponderados de ICFS total que se interpreten diferente al control T0, no se observa un cambio en el suelo en esta profundidad tras la aplicación de purines.

Tabla 5. índice de calidad física de suelos (ICSF) Total, de acuerdo a los parámetros físicos evaluados en el horizonte genético B, para los diferentes años de aplicación de purines.

ICFS Total horizonte genético B							
	T0	T2	T4	T6	T8	T10	T12
MO	*1	1	1	1	1	1	1
Da	1	1	1	1	1	1	1
Pt	1	1	1	1	1	1	1
MAC	3	3	2	3	3	3	3
MIC	3	3	3	3	3	3	3
AWP	1	1	1	1	2	1	-1
TOTAL	10	10	9	10	11	10	8

MO: materia orgánica; Da: densidad aparente; Pt: porosidad total; MAC: macroagregados; MIC: microagregados; AWP: altura de agua aprovechable o HA. T0= control sin aplicación de purines; T2= dos años aplicación de purines; T4= cuatro años aplicación de purines; T6= seis años aplicación de purines; T8= ocho años aplicación de purines; T10= diez años aplicación de purines; T12= doce años aplicación de purines. *índice de calidad física según niveles de referencia.

En la Tabla 6 y Tabla 7 se muestran los resultados de las correlaciones entre las distintas propiedades físicas y la MO en el suelo de estudio. En el primer horizonte, destaca la correlación negativa entre MO y MAC. En contraste, Martínez *et al.* (2008) mencionan que existe una correlación positiva entre el porcentaje de estabilidad de los agregados y el contenido de MO en el suelo; mientras mayor es el contenido de

carbono orgánico del suelo lábil, mayor es el tamaño de los agregados.

Tabla 6. Correlación de Pearson entre materia orgánica (%) y otras variables estudiadas para el horizonte genético A.

Variable (1)	Variable (2)	Pearson	p-valor
MO	MO	1,00	<0,0001
MO	Da	-0,40	0,0352
MO	Pt	0,39	0,0379
MO	HA	0,40	0,0341
MO	MAC	-0,69	<0,0001
MO	MIC	-0,20	0,2967

MO: materia orgánica; Da: densidad aparente; Pt: porosidad total; MAC: macroagregados; MIC: microagregados; HA: humedad aprovechable.

Tabla 7. Correlación de Pearson entre materia orgánica (%) y otras variables estudiadas para el horizonte genético B.

Variable (1)	Variable (2)	Pearson	p-valor
MO	MO	1,00	<0,0001
MO	Da	0,01	0,9475
MO	Pt	-0,06	0,7701
MO	HA	0,14	0,4764
MO	MAC	0,68	0,0001
MO	MIC	-0,27	0,1614

MO: materia orgánica; Da: densidad aparente; Pt: porosidad total; MAC: macroagregados; MIC: microagregados; HA: humedad aprovechable.

La Tabla 6 muestra una correlación negativa entre MO y Da, en concordancia con Romero-Barrios *et al.* (2015) quienes reportan una relación negativa existente entre la Da y la materia orgánica en los suelos. Esto se traduce en que, a mayor contenido de MO en el suelo, la Da disminuye; y una correlación positiva entre MO y HA para el horizonte A. Los aportes de materia orgánica contribuyen a aumentar la

capacidad de retención de agua del suelo (Álvarez-Sánchez *et al.* 2020).

Respecto al horizonte B (Tabla 7), se observó que el contenido de materia orgánica presento una correlación positiva con la variable Macroagregados, lo cual es concordante con lo mencionado por Arshad *et al.* (2004) quienes asociaron positivamente el CO del suelo con los MAC y negativamente con los MIC.

CONCLUSIONES

1. La aplicación de purines de lechería modifico los parámetros físicos del suelo, generando un aumento en el contenido de materia orgánica hasta el sexto año en el horizonte A y hasta el octavo año en el horizonte B, disminución de la densidad aparente presente en el horizonte A en las parcelas que recibieron entre cuatro a diez años de aplicación de purines.
2. El Índice de calidad física de suelos empleado interpretó que la aplicación de purines de lechería no modifico mayormente la calidad del suelo, resultando todos los tratamientos en una condición “media”.

REFERENCIAS

1. Acevedo, I., J. Contreras, R. Gonzalez, I. Acevedo y O. Garcia. 2014. Efecto de la aplicación de materia orgánica sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo de huerto. Revista de la Facultad de agronomía de la universidad del Zulia 31(3): 325-340.
2. Aedo, N. 1996. Morfología de una gramínea y leguminosa típica. pp: 27-39. En: I. Ruiz (Ed.). Praderas para Chile. (2a ed.). Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile.
3. Aguilera, S., G. Borie, P. Peirano, M. Mora y R. Demanet. 1995. Caracterización de Purines para su potencial uso como fertilizante y mejorador de suelos. Agríc. Téc. (Chile) 55(3-4): 251-256.
4. Álvarez-Sánchez, M., R. Maldonado-Torres, C. Nájera-Rosas y D. Cristóbal-Acevedo. 2020. Manejo agroecológico para la restauración de la calidad del suelo. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 11(4): 741-752.
5. Arshad M., A.J. Franzluebbbers and R.H. Azooz. 2004. Surface-soil structural properties under grass and cereal production on a Mollic Cyroboralf in Canada. Soil tillage res. 77(1): 15-23

6. Amacher, M. C., O'Neil, K. P., Perry, C. H. 2007. Soil vital signs: A new Soil Quality Index (SQI) for assessing forest soil health. [en línea]. U.S.D.A, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Estados Unidos. <<https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/27300>>. [Consulta: 04 julio 2022]
7. Besoain, E. 1985. Mineralogía de los suelos volcánicos del centro-sur de Chile. pp: 109-302. En: J. Tosso (Ed.). Suelos volcánicos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile.
8. Bhogal, A., F. Nicholson and B. Chambers. 2009. Organic carbon additions: effects on soil bio-physical and physico-chemical properties. Eur. J. Soil Sci. 60(2): 276-286.
9. Bronick, C.J. and R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. Geoderma 124(1-2): 3-22.
10. Candia, O., M. Mora, R. Demanet, G. Briceño and G. Palma. 2012. Effect of liquid cow manure amendment on dimethenamid persistence in a volcanic soil. J. Soil Sci. Plant Nutr. 12(1): 153-163.
11. Consejo Nacional de Producción Limpia. 2012. Guía de mejores técnicas disponibles para la aplicación de purines del sector bovino en praderas y cultivos del sector agropecuario [en línea]. Consejo Nacional de Producción Limpia, Chile. <<http://www.cpl.cl/archivos/documentos/11.pdf>>. [Consulta: 15 octubre 2019].
12. Decreto Supremo N°46. Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. 17 enero 2003. Santiago, Chile.
13. Decreto Supremo N°90. Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. 07 marzo 2001. Santiago, Chile.
14. Demanet, R., M. Aguilera, M. Mora. 1999. Efecto de la aplicación de purines sobre el sistema suelo - planta. Frontera Agrícola 5(1-2): 87-94.
15. Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada y C. Robledo. 2008. InfoStat versión 2008 [en línea: programa computacional]. InfoStat. <<http://www.infostat.com.ar>> [Consulta: 10 abril 2021].

16. Dumont, J.C. 2003. Propuestas para el manejo de efluentes de lecherías. En: N. Teuber, H. Uribe y L. Opazo (Eds.). Seminario: hagamos de la lechería un mejor negocio. Del 28 de agosto al 01 de septiembre. Serie de Actas N°24. INIA Remehue. Osorno, Chile.
17. Eche, N., E. Oyema, I. Amapui and M. Bruns. 2013. Effect of application of organic and mineral soil amendments in a continuous cropping system for 10 years on chemical and physical properties of an Alfisol in Northern Guinea Savanna zone. *International Journal of Agricultural Policy and Research* 1(4): 116-123.
18. Eswaran H., E. Van Den Berg and P. Reich. 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil sci. Soc. Am. J.* 57(1): 192-194.
19. Fleige, H., S. Beck-Broichsitter, J. Dörner, M. Goebel, J. Bachmann and R. Horn. 2016. Land use and soil development in southern Chile: Effects on physical properties. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 16(3): 818-831.
20. Hati, K., A. Swarup, A. Dwived, A. Misra and K. Bandyopadhyay. 2007. Changes in soil physical properties and organic carbon status at the topsoil horizon of a vertisol of central India after 28 years of continuous cropping, fertilization and manuring. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 119(1-2):127-134.
21. Haynes, R.J. and R. Naidu. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutr. Cycling in Agroecosyst.* 51(1): 123–137.
22. Hemmat, A., N. Aghilinategh, Y. Rezainejad and M. Sadeghi. 2010. Long-term impacts of municipal solid waste compost, sewage sludge and farmyard manure application on organic carbon, bulk density and consistency limits of a calcareous soil in central Iran. *Soil tillage res.* 108(1): 43-50.
23. Instituto Nacional de Normalización. 1978. Requisitos de calidad de agua para diferentes usos. NCh1333: Of. 78 modificada en 1987. Santiago, Chile.
24. Martínez, E., J. Fuentes, E. Acevedo. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 8(1): 68-96.
25. Martínez-Lagos, J., F. Salazar, M. Alfaro, M. Rosas, E. Rampoldi y F. Macias. 2014. Factores edafoclimáticos que afectan las emisiones de amoníaco por aplicación de urea y purín de lechería en andosoles. *Chilean J. Agric. Anim. Sci.* 30(1): 15-28.

26. Pedraza, C. 1996. Fertilización. Uso del estiércol. Rev. Tierra Adentro 1(9): 24-28 [en línea].
27. Peralta, G. 2022. Situación internacional y nacional del sector lácteo bovino. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Santiago, Chile.
28. Pizarro, C.G. 2000. Mineralogía de los óxidos de hierro y equilibrios de intercambio catiónico en suelos volcánicos chilenos. Trabajo de graduación, Doctor en Química. Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Química y Biología. Santiago, Chile.
29. Pozo, A. del, I. Matus, M.D. Serret and J.L. Araus. 2014. Agronomic and physiological traits associated with breeding advances of wheat under high-productive Mediterranean conditions. The case of Chile. Environ. Exp. Bot 103: 180-189.
30. Rasool, R., S. Kukal and G. Hira. 2008. Soil organic carbon and physical properties as affected by long-term application of FYM and inorganic fertilizers in maize-wheat system. Soil and Tillage Research 101(1-2): 31-36.
31. Romero-Barrios, C., E. Garcia-Gallegos y E. Hernández-Acosta. 2015. Materia orgánica y densidad aparente en suelos del suroeste de La Malinche, Tlaxcala, México. REIBCI 2(5): 63-70.
32. Sadzawka, A., M. Carrasco, R. Grez, M. Mora, H. Flores Y A. Neaman. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile: Revisión 2006. Serie Actas INIA N°34. INIA La Platina. Santiago, Chile.
33. Salazar, F., J. Dumont, D. Chadwick, R. Saldaña, y M. Santana. 2007. Characterization of Dairy Slurry in Southern Chile Farms. Agric. Téc. (Chile) 67(2): 155-162.
34. Salazar, F., J.C. Dumont, M.A. Santana, B.F. Pain, D.R. Chadwick y E. Owen. 2003. Prospección del manejo y utilización de efluentes de lecherías en el sur de Chile. Archivos de medicina veterinaria 35(2): 215-225.
35. Salcedo-Pérez, E., A. Galvis-Spínola, T. Hernández-Mendoza, R. Rodríguez-Macias, F. Zamora-Natera, R. Bugarin-Montoya y R. Carrillo-González. 2007. La humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo. Terra Latinoamericana 25(4): 419-425.

36. Sandoval, M., N. Stolpe, E. Zagal and M. Mardones. 2007. Effect of crop–pasture rotations on the C, N and S contents of soil aggregates and structural stability in a volcanic soil of south-central Chile. *Acta Agr. Scand. Section B-Soil and Plant Science* 57(3): 255–262.
37. Sandoval-Estrada, M., N. Stolpe-Lau, E. Zagal-Venegas, M. Mardones-Flores y J. Celis-Hidalgo. 2008. Aporte de carbono orgánico de la labranza cero y su impacto en la estructura de un andisol de la Precordillera Andina Chilena. *Agrociencia* 42(2): 139-149.
38. Sandoval-Estrada, M., J. Celis-Hidalgo, N. Stolpe-Lau y J. Capulín-Grande. 2010. Efecto de enmiendas con lodos urbanos y de salmonicultura en la estructura de un Entisol y un Alfisol en Chile. *Agrociencia* 44(5): 503-515.
39. Sandoval, M., J. Dorner, O. Seguel, J. Cuevas y D. Rivera. 2012. *Métodos de Análisis Físicos de Suelo*. Universidad de Concepción. Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales N°5. Chillán, Chile.
40. Sandoval, M., C. Pérez, J. Recio, J. Sánchez, J. Capulín y A. Pérez. 2020. *Manual de evaluación y restauración agro-ecológica de suelos de uso agropecuarios afectados por incendios*. Proyecto ARIII70003. ANID. Coronel, Chile.
41. Santis, G.T. 2005. *Mapa de reconocimiento de suelos de la Región del Bío-Bío (sector norte)*. Memoria de título, Ingeniero Agrónomo mención Manejo de Suelos y Aguas. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Escuela de Agronomía. Santiago, Chile.
42. Soto, P. 1996. Consideraciones para elegir una especie o mezcla forrajera. pp: 139-179. En: I. Ruiz (Ed.). *Praderas para Chile*. (2a ed.). Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile.
43. Stolpe, N.B. 2006. *Descripciones de los principales suelos de la VIII Región de Chile*. Publicaciones del Departamento de Suelo y Recursos Naturales N°1. Universidad de Concepción. Facultad de Agronomía. Chillán, Chile.
44. Venegas, A.P. 2008. *Características de la materia orgánica de suelos de praderas naturales y cultivadas en la IX Región*. Memoria de título, Químico. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, Departamento de Química Inorgánica y Analítica. Santiago, Chile.

45. Vial, M. y M. Sandoval. 2015. Soil structural condition and its relationship with pastures under different conditions in the Simpson Valley (Humid western Patagonia, Chile). *Idesia*. 33(4): 31-40.
46. Yoder, R. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Jam. Soc. Agron.* 28(5): 337-351.

ANEXOS

Niveles de referencia e índice de calidad física de suelos:

Tabla 8. Niveles de referencia (NR) de materia orgánica (%) para suelos derivados de cenizas volcánicas y su índice de calidad física de suelos (ICFS).

NR (%)	Interpretación	ICFS
≥ 17,0	Muy alto	3
11 – 16,9	Alto	2
5,0 – 10,9	Moderado	1
3,0 – 4,9	Bajo	-1
< 3,0	Muy bajo	-2

Sandoval *et al.* (2020)

Tabla 9. Niveles de referencia (NR) e índice de calidad física de suelos (ICFS) para densidad aparente (Da) y porosidad total (Pt) para suelos derivados de cenizas volcánicas.

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

Sandoval *et al.*, (2020)

Tabla 10. Niveles de referencia (NR) de Macroagregados (MAC) y su índice de calidad física de suelos (ICFS).

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

Sandoval *et al.* (2020)

Tabla 11. Niveles de referencia (NR) de microagregados (MIC) y su índice de calidad física de suelos (ICFS).

NR (%)	Interpretación	ICFS
> 60	Totalmente desfavorable	-2
50 – 60	Desfavorable	-1
46 – 49	Poca favorable	1
40 – 45	Favorable	2
< 40	Muy Favorable	3

Sandoval *et al.* (2020)

Tabla 12. Niveles de referencia de Altura de agua aprovechable (AWP) y su índice de calidad física de suelos (ICFS).

NR (cm)	Interpretación	ICFS
> 18	Muy bueno	3
12 – 18	Bueno	2
9,5 – 12	Regular	1
5,0 – 9,5	Pobre	-1
< 5,0	Muy pobre	-2

Sandoval *et al.* (2020)

Tabla 13. Índice de calidad física de suelos (ICFS) Total, interpretación según su nivel y recomendación general (adaptada).

ICFS total	Interpretación del nivel de calidad	Recomendación
> 15	Adecuado	Mantener manejo sostenible
15 - 7	Medio	Identificar los valores críticos e implementar acciones de remediación
< 7,0	Bajo	Identificar los valores críticos y diseñar plan de manejo sustentable

Sandoval *et al.* (2020)