



## Capacidad de filtro de los suelos del sur de Chile a la aplicación de lodos de piscicultura

### Filtering capacity of soils in southern Chile to fish breeding sludge application

Schlatter, J.E.<sup>a</sup>, Romeny, G.<sup>a</sup>, Madariaga, S.<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Laboratorio de Nutrición y Suelos Forestales, Instituto de Bosques y Sociedad, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile.

<sup>b</sup> Centro de Docencia Superior en Ciencias Básicas, sede Puerto Montt, Universidad Austral de Chile, Casilla 1327, Puerto Montt, Chile.

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 17.09.2019  
Accepted 04.05.2020

##### Keywords:

Organic fertilizer  
Filter capacity  
Volcanic soils  
Nutrient percolation

Original Research Article,  
Soil Science

##### \*Corresponding author:

Juan Schlatter

E-mail address:

[jschlatt@uach.cl](mailto:jschlatt@uach.cl)

#### ABSTRACT

The behavior and effects of fish breeding sludge on soil and plants are scarcely known. This study analysed the capacity of volcanic ash soils to neutralise and filter the effects of fish breeding sludge after application. Three doses of sludge were used under controlled conditions: 30-32 t ha<sup>-1</sup>, 60-64 t ha<sup>-1</sup> and 120-128 t ha<sup>-1</sup> applied to 45 cm columns of soil, using three repetitions per treatment during 6 months and replicating it twice during the year: autumn-winter and spring-summer. Unlike lake or sea sludge, fish breeding sludge is high in nitrogen (7.8-11.5% dry matter) which was quickly leached as ammonium and nitrate reaching maximum values during the first month in sandy soils, exceeding the norms at all doses. In loamy soils this maximum is delayed by 4 months, also with values above the norm. The recommended maximum dose is approximately 20-25 t of raw sludge for loamy soils and 10-13 t for sandy soils. Loamy soils neutralise effectively the smell of this sludge, especially if incorporated into the soil (crop). The application of fish breeding sludge into soils significantly improves the nutritional content of nitrogen and phosphorus and, to a lesser extent, calcium, potassium, and some iron, sulfur, manganese, copper, zinc and boron.

#### RESUMEN

Los lodos de piscicultura son residuos del cultivo de alevines, que deben ser reciclados. Una alternativa es su neutralización por suelos de origen volcánico al aplicarlos como abonos. Este trabajo determinó el efecto de tres dosis de lodos: 30-32 t ha<sup>-1</sup>, 60-64 t ha<sup>-1</sup> y 120-128 t ha<sup>-1</sup>, incorporadas sobre columnas de 45 cm de suelo, cuyos percolados fueron analizados en un período de 6 meses. El ensayo fue replicado dos veces en el año: otoño-invierno y primavera-verano. Los lodos crudos de piscicultura contienen, a diferencia de los lodos de fondo de lago o mar, mucho nitrógeno (7,8-11,5% de la materia seca), el que fue rápidamente lixiviado como amonio y nitrato, con valores máximos el primer mes en suelos arenosos y superando las normas en todas las dosis. En suelos más limosos este máximo se posterga a los 4 meses, también con valores sobre la norma. De acuerdo con estos resultados, la dosis máxima a aplicar a un suelo se estima en 20-25 t de lodos crudos en suelos limosos y 10-13 t en suelos arenosos, en ciclos de al menos tres años. Los suelos limosos mostraron ser efectivos en neutralizar el olor de los lodos especialmente si estos son incorporados al suelo (cultivo). El efecto de los lodos en los suelos es muy positivo, al mejorar significativamente los contenidos nutritivos en nitrógeno y fósforo, en menor proporción: calcio, potasio, y magnesio y aun menor hierro, azufre, manganeso, cobre, zinc y boro.

*Palabras clave:* abono, capacidad de filtro, suelos volcánicos, percolación de nutrientes

#### INTRODUCCIÓN

El desarrollo alcanzado por el cultivo de salmónidos en cautiverio, en el Sur de Chile, ha sido enorme, logrando después de 30 años una producción de 900.000 toneladas en 2014 (Chávez *et al.*, 2019). Las pisciculturas, como primera fase de este cultivo, se instalan en el continente, cercanos a arroyos de cau-

dal bien oxigenado, generalmente en la precordillera. El resultado, como en cualquier proceso de cultivo, es que se producen, además de alevines, residuos orgánicos conocidos como lodos de piscicultura, los que deben ser separados del lugar y del proceso. Actualmente este lodo, generado en las pisciculturas, es tratado y depositado en vertedero. Sin embargo, esta vía de solución no es sustentable, porque los vertederos reciben

actualmente un exceso de residuos, también de otros orígenes, y no son capaces de reciclarlos o neutralizarlos. Por este motivo, se ha estado experimentando con la aplicación de estos lodos a suelos (Mazzarino *et al.*, 1997; Pinochet *et al.*, 2001; Teuber *et al.*, 2007; Sandoval *et al.*, 2010), para que ellos sean descompuestos, filtrados y neutralizados, sin contaminar el ambiente, y a la vez sirvan de abono para los vegetales. Pero, existe la duda sobre la eficiencia de los suelos para poder cumplir esa función, por su diversidad en la naturaleza, por la cantidad de lodos que deben aplicarse, por su olor nauseabundo y por los riesgos de contaminación de suelos y agua.

La región de Los Lagos representa alrededor de un 40% de la producción en salmoneicultura de todo el país según el Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (SERNAPECA), lo que trae beneficios económicos, pero genera pasivos ambientales. Es por esto que sus autoridades manifestaron un especial interés por analizar el efecto de los lodos en las características de los suelos y en el agua de percolación, bajo ellos. Por este motivo es que se efectuó el presente estudio, para analizar qué tan eficientes son los suelos para cumplir la función esperada: de filtrar y neutralizar los lodos; pero también evaluar el aporte que estos últimos pueden ser para la fertilidad de un suelo, que según Mazzarino *et al.* (1997) y Sandoval *et al.* (2010) pueden lograr efectos muy positivos. En este contexto se realizó un ensayo, que tuvo como objetivo simular la aplicación de lodos de piscicultura a dos suelos característicos de la región de Los Lagos: suelos de textura media, areno limosos y suelos de textura gruesa, arenosos.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Suelos estudiados

En primer lugar, se recorrió ambas provincias y se decidió seleccionar dos clases de suelos característicos de ellas: los suelos derivados de cenizas volcánicas o trumao, con textura areno limosa, y los suelos formados por sedimentos laháricos y aluviales recientes, principalmente de gravas y arenas volcánicas (INIA, 1985). El nombre de clase de estos suelos se simplificó a lo siguiente: suelos limosos (SL) y suelos arenosos (SA), respectivamente, para distinguirlos. Las muestras de suelos limosos, que se requirieron para el estudio, fueron extraídas de un corte, lado del camino asfaltado que une Pto. Octay (desvío alto) con Las Cascadas y que correspondería a la serie Puerto Octay, que representa en su composición granulométrica al grupo de los suelos trumao. Los suelos arenosos se obtuvieron de un lahar entre el volcán Osorno y el volcán Calbuco, entre Ensenada y el río Patas.

Los SL son los más comunes en estas provincias y ocupan gran parte de su territorio, en cambio los SA

están circunscritos a los alrededores de los volcanes (INIA, 1985). Los SL de la región fueron habilitados, en una gran proporción, para predios agrícolas o ganaderos, aunque en el territorio restante, principalmente constituido por planos fluvio-glaciales, quebradas, cerros, colinas y montañas, aún existen bosques. Los SA, en cambio, están destinados principalmente al sector forestal o a la protección, esto último especialmente en cajas de ríos (Lara *et al.*, 2012).

El SA utilizado presenta una composición granulométrica formada por un 9% de gravilla, 50% de arena gruesa, 38% de arena media y 3% de arena fina, sin fracciones más finas. Para este efecto el SA se analizó utilizando los tamices correspondientes. El SL en cambio presenta 5% de arena gruesa, 12% de arena media, 52% de arena fina y 31% de limo, dato obtenido de las determinaciones efectuadas para la serie, CIREN (2003). Este último suelo no es limoso estrictamente, sino areno-limoso, ya que predomina la fracción arenosa, aun así, se trata de un suelo mucho más fino que el anterior y se prefirió identificarlo como limoso.

En Cuadro 1 se observa que el SL presenta un muy alto contenido de materia orgánica (MO), con 17,7%, característico para suelos trumao, en cambio el SA es muy pobre en ella.

### Recolección de muestras

En la primera etapa los SL fueron extraídos en las cercanías de Puerto Fonck (marzo 2013), sobre el trayecto indicado anteriormente, ocupando tubos de PVC de 4" de diámetro (10,5 cm) y 50 cm de largo, los que se enterraron alrededor de 45 cm de profundidad, extrayéndolos y después sellándolos en su parte de abajo con una tapa dimensionada del mismo material. Las muestras de SA presentaron más resistencia a la extracción directa en el perfil, pero como estos sedimentos presentan una estructura de grano simple, fueron incorporados al tubo con pala hasta completar 45 cm de profundidad. En el mes de julio (12 de julio), se recolectaron nuevas muestras de suelo en terreno, de los mismos lugares y en un número equivalente a la primera etapa.

Las muestras de suelo así obtenidas fueron transportadas a Valdivia, donde se ubicaron bajo techo, pero en una instalación aireada, considerando que sobre ellos se aplicarían lodos de olor pestilente. Los tubos se dispusieron en forma vertical, en muebles especialmente diseñados para su dimensión, procediendo a montarlos, con suelo, sobre embudos, conectados a través de la tapa inferior perforada. Estos embudos a su vez desembocaron en vasos plásticos, en los cuales se recibió el agua que percoló a través del suelo (percolados) (Figura 1).

La aplicación de lodos sobre suelos se replicó en dos etapas: inicio de otoño, época en que se estable-

**Cuadro 1.** Características de los suelos utilizados para la aplicación de los lodos.**Table 1.** Characteristics of the soils used for the application of sludge.

Parámetro	Unidades	Clase de suelo		Parámetro	Unidades	Clase de suelo	
		Arena	Limoso			Arena	Limoso
pH (agua)		6,1	5,6	Al (extraíble)	(mg kg <sup>-1</sup> )	104	1700
pH (KCl)		5,6	4,9	Al (intercamb.)	(cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,1	0,2
Ct	(%)	0,2	10,2	Suma de bases	(cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,4	5,2
Nt	(%)	0,02	0,6	CICE	(cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,4	5,4
M.O.	(%)	0,41	17,7	Sat. Aluminio	(%)	16,3	3,2
C/N		14,5	17,0	Fe	(mg Kg <sup>-1</sup> )	11	269
P (Olsen)	(mg Kg <sup>-1</sup> )	3,6	2,8	Mn	(mg Kg <sup>-1</sup> )	1	19
K	(cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,03	0,2	Cu	(mg Kg <sup>-1</sup> )	2,4	7,3
Ca	(cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,3	4,7	Zn	(mg Kg <sup>-1</sup> )	1,0	4,3
Mg	(cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,0	0,2	S	(mg Kg <sup>-1</sup> )	0,9	5,8
Na	(cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,1	0,2	B	(mg Kg <sup>-1</sup> )	0,1	0,2

Carbono total: Ct; Nitrógeno total: Nt; Materia orgánica: M.O.

cen los cultivos de invierno en Chile, y terminando el invierno o comienzos de primavera, previo al establecimiento de los cultivos de primavera; para cada etapa se recolectaron muestras de ambos suelos y de los mismos lugares.

### Caracterización de lodos

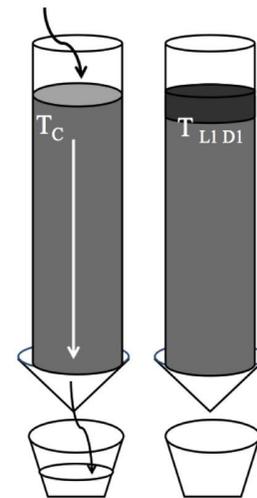
Los lodos crudos utilizados en la primera etapa muestran una cantidad > 71% de agua, en promedio cercano a 80% (Cuadro 2). El otro 20% son sólidos, constituidos entre 40-60% por MO. En cuanto a los elementos destaca la presencia de elementos nutritivos que son deficientes en los suelos de la región estudiada: fósforo (P), bases, azufre (S), boro (B), zinc (Zn) y cobre (Cu).

Por otro lado, no se detectó presencia de antibióticos (florfenicol, ácido oxolínico, ciprofloxacino, enrofloxacin, flumequina u oxitetraciclina) en las muestras de lodo analizadas (Madariaga, 2014). En general este residuo presenta una reacción levemente ácida, casi neutral, con altos contenidos de nitrógeno y fósforo. Su contenido de metales se encuentra por debajo de los valores máximos permitidos por el DS04/20094. De acuerdo con las condiciones de higienización (contenido de coliformes fecales, Salmonella sp. y densidad de ovas helmíntica viable) constituyen lodos Clase A, con contenidos no perceptibles.

### Implementación de ensayo y aplicación de lodo

Los tubos fueron ordenados e identificados de acuerdo con las clases de suelos (2) y de lodos (2). En

marzo del año 2013 se inició el proceso de toma de muestras en terreno y a fines de ese mes estaba instalado el ensayo para aplicar los lodos sobre el suelo y comenzar a regar, simulándose la pluviometría promedio de la ciudad de Puerto Montt (Fuenzalida, 1966). El 28 de marzo se aplicaron los lodos crudos (primer grupo), incorporándolos en forma mecánica unos 3-5 cm en el suelo, utilizando una herramienta manual para ello.



**Figura 1.** Esquema de los tubos de PVC con las muestras de suelo, en este caso se indica izquierda: T = trumao, C = control; derecha: L1 = lodo 1 y D1 = dosis baja.

**Figure 1.** Schematic representation of PVC pipes with soil samples. From left: T = trumao, C = control; right: L1 = sludge 1 and D1 = low dose.

**Cuadro 2.** Características de los lodos de piscicultura aplicados en el ensayo.**Table 2.** Characteristics of fish breeding sludge applied during the assay.

Parámetro	Unidad	Lodos primera etapa		Lodos segunda etapa			
		L1	L2	L1 crudo	L2 crudo	L1 digerido	L2 digerido
Humedad	%	82	82	86	86	93	89
pH		6,8	6,4	7,0	7,1	7,8	7,5
Ct	%	34,4	22,8	26,9	18,2	28,7	22,4
Nt	%	10,5	7,8	7,7	9,9	11,5	7,8
P total	%	2,7	3,2	4,0	3,7	5,3	5,9
P disponible	%	0,3	0,2	0,5	0,3	0,6	0,4
Na total	mg kg <sup>-1</sup>	2560	6440	1685	5197	14484	17453
Na disponible	mg kg <sup>-1</sup>	1016	4201	772	4115	11066	15439
K total	mg kg <sup>-1</sup>	894	1460	758	816	993	1006
K disponible	mg kg <sup>-1</sup>	344	505	422	528	893	966
Ca total	%	4,3	8,1	9,9	9,3	8,7	12,3
Ca disponible	%	3,7	4,1	5,0	4,8	3,8	5,5
Mg total	mg kg <sup>-1</sup>	2840	4740	2141	1582	1770	1997
Mg disponible	mg kg <sup>-1</sup>	894	1021	470	662	795	1421
Fe total	mg kg <sup>-1</sup>	2690	4720	7013	3741	7416	6430
Fe disponible	mg kg <sup>-1</sup>	2609	3330	960	851	2937	3346
Mn total	mg kg <sup>-1</sup>	133	440	423	534	579	645
Mn disponible	mg kg <sup>-1</sup>	117	422	129	171	209	450
Cu total	mg kg <sup>-1</sup>	150	178	255	246	348	315
Cu disponible	mg kg <sup>-1</sup>	22	23	8,6	9,2	5,3	1,8
Zn total	mg kg <sup>-1</sup>	561	1080	1007	1076	1246	1446
Zn disponible	mg kg <sup>-1</sup>	261	383	368	314	309	404
Al total	mg kg <sup>-1</sup>	3440	5500	6753	6589	9560	8459
Al extraíble	mg kg <sup>-1</sup>	322	655	112	218	1417	2036
B total	mg kg <sup>-1</sup>	3830	5670	1664	1744	5467	6100
S total	mg kg <sup>-1</sup>	9830	13580	3248	3629	4083	2800

El 1° de abril del 2013 se iniciaron los riegos sobre 42 muestras (36 con lodos, considerando tres repeticiones por dosis y 6 de control).

Los lodos crudos semideshidratados, también incorporados al suelo superficial, pudieron aplicarse 15 días después (otras 36 muestras; segundo grupo), debido al tiempo ocupado por el proceso de deshidratación, de tal manera que la mitad del ensayo se inició desfasado en 2 semanas, desfase que se respetó hasta el final de los 6 meses de tratamiento.

Las dosis de lodo aplicadas fueron las siguientes:

- Lodos crudos (82% humedad): 32,5 t ha<sup>-1</sup> (dosis baja), 65 t ha<sup>-1</sup> (dosis media) y 130 t ha<sup>-1</sup> (dosis alta)

- Lodos crudos semideshidratados (30% humedad): 8,4 t ha<sup>-1</sup> (dosis baja), 16,7 t ha<sup>-1</sup> (dosis media) y 33,4 t ha<sup>-1</sup> (dosis alta)

La materia seca correspondiente fue de: 5,9 t ha<sup>-1</sup> (dosis baja), 11,7 t ha<sup>-1</sup> (dosis media) y 23,4 t ha<sup>-1</sup> (dosis alta).

El riego consideró una pluviometría de 143,2 mm para el mes de abril, lo que debía repartirse basado en la probabilidad de días de lluvia. Esto significó, para la superficie del tubo, aplicar 82,6 ml día<sup>-1</sup>, lo que se repartió en dos dosis de 41,3 ml, aplicados con dispensador.

El riego, una vez aplicado, causó que en pocos días las muestras iniciaran el goteo por percolación, espe-

cialmente en SA, aunque los SL demoraron 3-5 días más. Las muestras de agua percolada se recibieron en envases de plástico, se trasvasijaron a bidones plásticos, acumulando el agua correspondiente a un mes. Completado el mes, estas muestras de agua dieron origen a submuestras, en envases menores, todo convenientemente rotulado, las que se trasladaron al laboratorio para su análisis. El riego se recalculó cada mes, de acuerdo a la correspondiente pluviometría promedio, medida y calculada, de la ciudad de Puerto Montt (Fuenzalida, 1966), para así simular las condiciones que se presentarían en la provincia de Llanquihue (enero 90 mm, febrero 89 mm, marzo 130 mm, abril 143 mm, mayo 229 mm, junio 244 mm, julio 232 mm, agosto 200 mm, septiembre 163 mm, octubre 118 mm, noviembre 108 mm y diciembre 95 mm).

Esta etapa del ensayo finalizó a fines de septiembre (primer grupo) y 15 de octubre (segundo grupo), dando origen a muestras de percolados que se recolectaron mes a mes, durante 6 meses. Una vez finalizada esta etapa, los suelos se dejaron un tiempo en su lugar, para que perdieran el exceso de agua. Posteriormente, el suelo de cada columna fue dividido en dos estratos: uno superficial de 0-10 cm, que representa aquel suelo con directo contacto con el lodo, y uno de 10-45 cm, que representa aquella parte del suelo que solo fue transitada por el agua de percolación. Cada estrato dio origen así a muestras distintas. Las muestras se obtuvieron mezclando las repeticiones (3) de un mismo tratamiento, resultando 26 muestras por estrato (incluidos los controles).

En la segunda etapa de aplicación de lodos se instalaron 72 muestras y esta vez sólo 4 de control (dos por cada suelo), sin lodos, sumando en total 76 muestras. A los primeros 36 tubos con suelo se les aplicó nuevamente lodos crudos (L1 y L2), a fines de julio, y se comenzaron a regar el 1° de agosto. A los 36 tubos con suelo restantes se les aplicó lodos digeridos (L1 y L2), 7 semanas después, apenas se recibieron. Los lodos digeridos son lodos crudos que fueron sometidos a una digestión anaeróbica a temperatura cercana a los 40 °C, con el fin de eliminar gérmenes y parte de los componentes volátiles. Sin embargo, las diferencias con los lodos crudos no fueron significativas, salvo un mayor contenido de sodio utilizado para optimizar la digestión (Cuadro 2). Estos lodos digeridos resultaron con más proporción de agua: alrededor de un 90%, lo que causó una baja en la densidad de 1,3 de los lodos crudos a 1,2 g cm<sup>-3</sup>. Las dosis aplicadas de ellos fueron esta vez equivalentes a: 30 t ha<sup>-1</sup> para dosis baja, 60 t ha<sup>-1</sup> para la dosis media y 120 t ha<sup>-1</sup> para la dosis alta, en calidad de lodos hidratados.

Las muestras de suelo tratadas con lodos digeridos recibieron un 50% más del agua que precipita en una pluviometría mensual, ya que debía finalizarse el ensayo a fines de enero 2014. Es así que en los meses

correspondientes se simuló en este caso una mayor intensidad de lixiviación. También a los lodos crudos se les tuvo que elevar la cantidad de pluviometría en enero, ya que, por la alta evapotranspiración en verano, las cantidades de agua de percolación no fueron suficientes. Por este motivo a todo el mes se elevó un 50% más de su pluviometría promedio y agregando, a los lodos digeridos, sobre esa cantidad un 25% más.

Al finalizar el período de riego se colectaron muestras de suelos para su análisis final, siguiéndose igual procedimiento al de la primera etapa. Las muestras de agua de los percolados se analizaron mensualmente en los siguientes elementos:

Mes 1: NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, P, S, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn y Al.

Mes 2: NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Al.

Mes 3: NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, Na, K, Ca, Mg, Cu y Al.

Mes 4: NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, Na, K, Ca, Mg y Cu.

Mes 5: NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, Na, K, Ca, Mg y Cu.

Mes 6: NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, Na, K, Ca y Mg.

Algunos elementos como el fósforo y zinc no se detectaron en cantidades registrables en los primeros meses con percolados, por lo que se dejaron de analizar los siguientes meses.

Las muestras de suelo tratadas con lodos, y los correspondientes controles, se analizaron químicamente según Sadzawka (2006) y AOAC (1984). Las columnas se dividieron en dos estratos: 0 a 10 cm (estrato superior) y 10 a 45 cm (estrato inferior). En el estrato superior se analizaron los siguientes elementos: carbono total (Ct) nitrógeno total (Nt), fósforo (P), sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), aluminio (Al), hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), y boro (B), además de pH. En el estrato inferior solo se analizaron: Nt, P y K.

### Análisis estadístico

El análisis estadístico se limitó a uno de carácter descriptivo. Para ello, se determinó el coeficiente de variación de los elementos determinados en los percolados, entre las repeticiones de muestras de suelo (n = 3). Esto permitió calcular la desviación estándar y con ella el coeficiente de variación de esos valores (Anexo).

## RESULTADOS

### Contenido de los principales elementos en las aguas de percolación

El agua de percolación obtenida bajo SA (suelos de arena gruesa) se tiñó de color por efecto de los lodos, especialmente en las dosis más elevadas. El agua toma

un color pardo rojizo en las dosis mayores, como apreciación visual, tono que se debilita hacia el amarillo a medida que la dosis es menor. También en el tiempo este efecto se va debilitando, así que después de 4 meses ya no es observable. En el caso de los SL, en cambio, no se observó cambio de color del agua, sino que esta se mantuvo transparente e incolora, conducta que fue observada en las dos etapas.

En el Cuadro 3 puede observarse que en todas las dosis se superó el contenido aceptable de nitrógeno como amonio, en el agua de percolación, según las normas del Instituto Nacional de Normalización (INN) y de la Organización Mundial de la Salud (OMS). La trayectoria de los valores de este elemento mes a mes se observa en Figura 2. En los SL (trumao), el amonio demora unos dos a tres meses para comenzar a ser determinado en los percolados. En cambio, en SA se detectó el primer mes. Las muestras de suelo en el ensayo no presentaron vegetación, de tal manera que ese factor no pudo evaluarse en su efecto.

Los niveles máximos de amonio en SL se detectan desde el cuarto mes, cuando se aplican lodos crudos, y al quinto mes cuando los lodos se aplican como lodo deshidratado (seco, 30% de contenido de agua).

En la Figura 2 se observa que en el agua de percolación el contenido de amonio aumenta claramente desde el tercer mes, logrando valores máximos al cuarto mes, con contenidos mayores en las dosis más altas. El proceso de lixiviación de amonio es mucho más rápido y violento en SA, donde se observa niveles mucho más altos en el primer mes, pero que cae rápidamente en los meses siguientes. Todo es menos rápido cuando se aplican lodos de menor contenido de agua. El coeficiente de variación es también más alto entre las repeticiones en suelos de arena, en este compuesto, en comparación a lo que sucede con el nitrato (Anexo).

En el caso del nitrato (Figura 3), la conducta es muy similar a la del amonio, pero en SA no logra los valores del catión, probablemente debido a que el

amonio es lixiviado antes de ser oxidado. Diferente es el caso en los SL, en los que la lixiviación de los elementos solubles de los lodos es un proceso más lento.

En el Cuadro 4 se observa que el N, como nitrato, también superó siempre el valor máximo aceptado por el INN para aguas de riego y consumo humano. La OMS acepta para esta forma de N hasta 50 mg L<sup>-1</sup>, valor común al que se acercaron los contenidos de los percolados en la mayor parte del período de análisis (Figura 3). Estos valores se alcanzan sin la presencia de vegetación sobre el suelo. Los demás elementos contenidos en los lodos no superaron en general los niveles máximos exigidos por el Instituto Nacional de Normalización (Cuadro 5).

El contenido de K en los percolados de los suelos tratados es superior al del control como puede observarse en Figura 4, lo que indicaría un aporte adicional por lodo (Cuadro 2). El K es un elemento muy soluble, de tal forma que también se detecta en los percolados al tercer mes, en SL y al primer mes en SA. Los coeficientes de variación, entre las repeticiones, es alto en ambos suelos (Anexo), demostrando la gran variación natural de los suelos.

El Ca (Figura 5) se comporta en forma similar, aunque más lento, que el potasio, especialmente por ser un elemento menos móvil en el suelo.

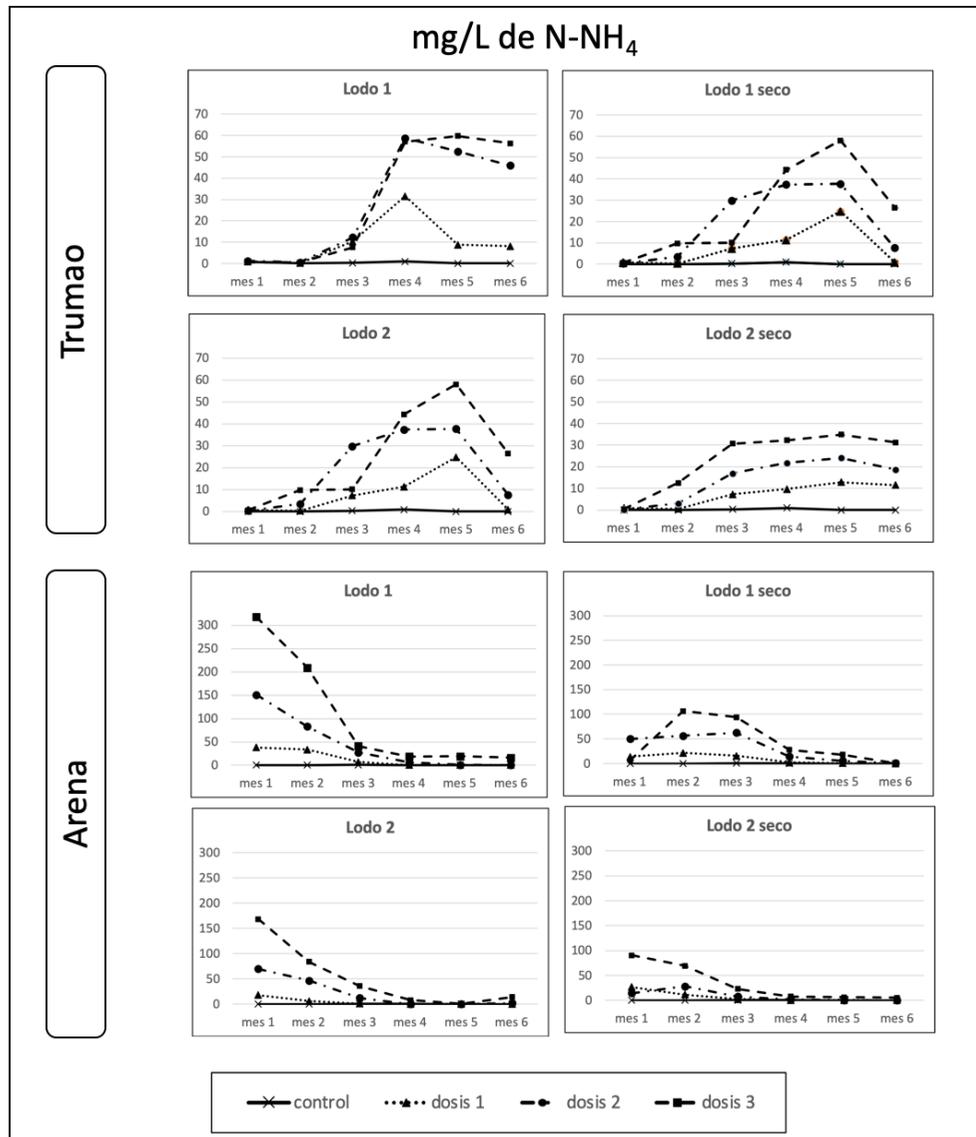
El Cu, como microelemento, también es incorporado a través de los lodos, pero las diferencias con el control no son muy notorias, salvo en los SA y especialmente para las dosis más altas (Figura 6). En el caso de este elemento la lixiviación es detectable hasta el cuarto mes.

La segunda etapa representó condiciones de clima más cálido y menos lluvioso (primavera/verano; septiembre – enero), se observó una dinámica similar a la primera temporada, pero con condiciones ambientales menos agresivas (menores precipitaciones, mayor evaporación). Estas diferencias se manifestaron con niveles algo menores de los elementos en los percolados y una reacción más lenta en la lixiviación.

**Cuadro 3.** Contenidos máximos de nitrógeno como amonio para percolados.

**Table 3.** Maximum levels of nitrogen as ammonium for leachates.

Elemento	Tratamiento	Suelo	Contenido máximo determinado mg L <sup>-1</sup>	Mes de la determinación del valor máximo	Valor máximo OMS mg L <sup>-1</sup>
N - NH <sub>4</sub>	32,5 t lodos crudos	Trumao	31,5	4	1,5
N - NH <sub>4</sub>	65 t lodos crudos	Trumao	58,7	4	1,5
N - NH <sub>4</sub>	130 t lodos crudos	Trumao	59,8	4 y 5	1,5
N - NH <sub>4</sub>	32,5 t lodos crudos	Arena	37,9	1	1,5
N - NH <sub>4</sub>	65 t lodos crudos	Arena	151	1	1,5
N - NH <sub>4</sub>	130 t lodos crudos	Arena	318	1	1,5



**Figura 2.** Trayectoria del contenido de nitrógeno en forma de amonio en percolados obtenidos después de aplicar distintas dosis de lodos crudos de piscicultura en suelos trumao (limosos, serie Puerto Octay) y de arena (lahar del volcan Osorno).

**Figure 2.** Pathway of the nitrogen content as ammonium in leachates obtained after applying different doses of raw fish breeding sludge to trumao (silty, Puerto Octay series) and sandy (lahar from Osorno volcano) soils.

**Cuadro 4.** Contenidos máximos de nitrógeno como nitrato en percolados.

**Table 4.** Maximum contents of nitrogen as nitrate in leachates.

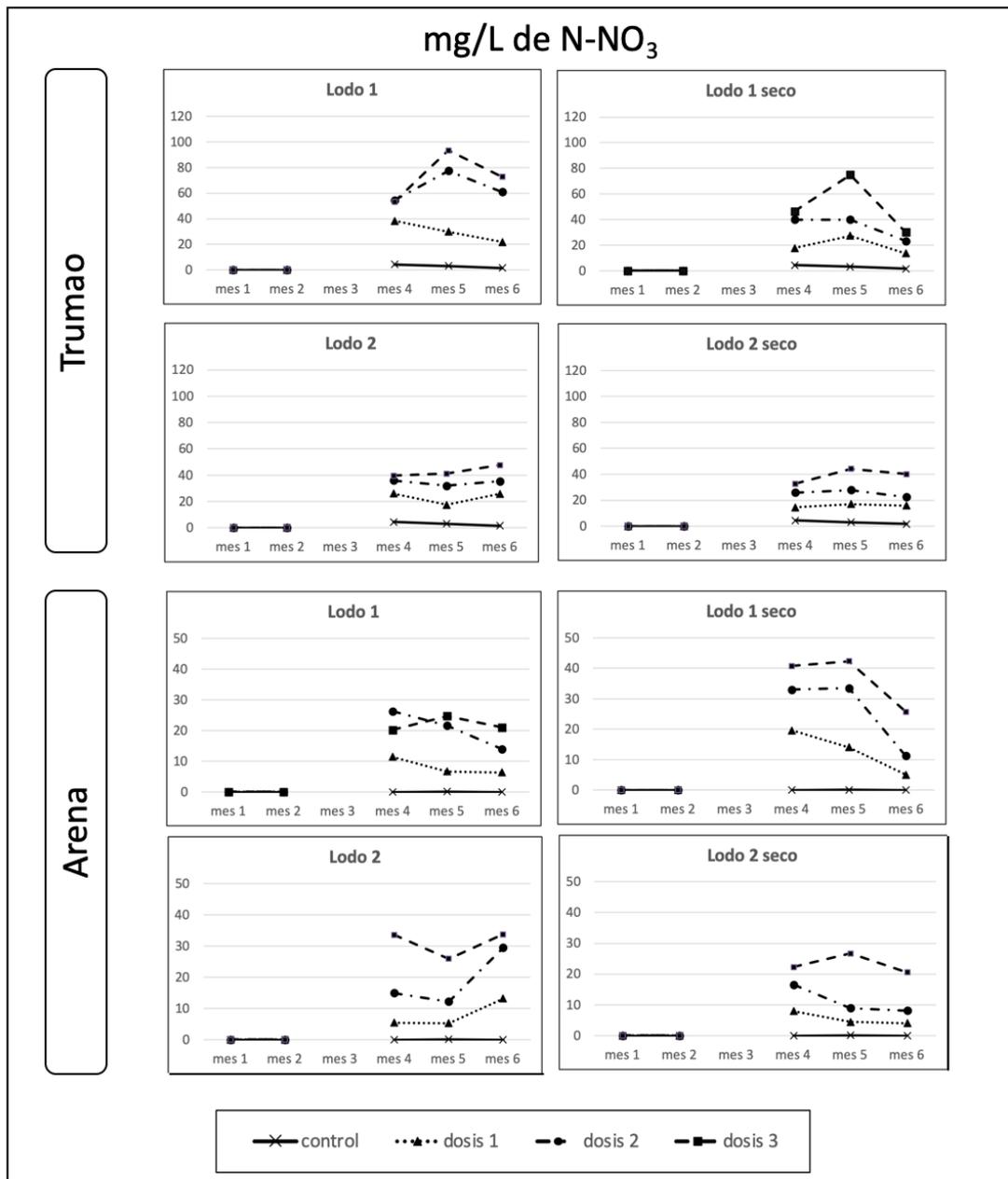
Elemento	Tratamiento	Suelo	Contenido máximo determinado mg L <sup>-1</sup>	Mes de la determinación del valor máximo	Valor máximo INN mg L <sup>-1</sup>
N - NO <sub>3</sub>	32,5 t lodos crudos	Trumao	38,4	4	10
N - NO <sub>3</sub>	65 t lodos crudos	Trumao	77,5	5	10
N - NO <sub>3</sub>	130 t lodos crudos	Trumao	93,3	5	10
N - NO <sub>3</sub>	32,5 t lodos crudos	Arena	43,2	2	10
N - NO <sub>3</sub>	65 t lodos crudos	Arena	60,5	1	10
N - NO <sub>3</sub>	130 t lodos crudos	Arena	180	1	10

**Efectos en el suelo**

Los SL contienen un alto nivel de materia orgánica (MO) en su estrato superior; como se desprende del Cuadro 1. Por ese motivo, no se detectaron analíticamente efectos notorios de cambios en su contenido que haya sido efecto de los lodos, después de 6 meses de ensayo o de incubación suelo-lodo. La MO en los primeros 10 cm de los controles fue de 13,4 % y 21,4% en la

primera y segunda etapa y los contenidos de los suelos tratados variaron entre 11,2-14,1% y 15,7-19,1% respectivamente. En cambio, en los SA, naturalmente pobres en MO, el efecto fue notorio (Figura 7).

En la Figura 7 se observa el aumento de materia orgánica en aquellos SA tratados con lodo, comparados con un control, en ambas etapas. En general la tendencia indica que, con mayor dosis de lodo aplicado, también aumenta la cantidad residual de MO en el suelo. El aumento



**Figura 3.** Trayectoria del contenido de nitrógeno en forma de nitrato en percolados obtenidos después de aplicar distintas dosis de lodos crudos de piscicultura en suelos trumao y de arena.

**Figure 3.** Pathway of the nitrogen content as nitrate in leachates obtained after applying different doses of raw fish breeding sludge to silty (trumao) and sandy soils.

de MO en los suelos tiene efectos en el contenido de N, como queda demostrado en la parte inferior de la Figura 7. Se observa que especialmente los lodos crudos de circulación abierta (L1) tuvieron un efecto mayor, causado por su aporte más elevado de N (Cuadro 2), en cambio los lodos provenientes de pisciculturas con recirculación (L2) aportaron menos MO y N. El aporte de estos últimos es mayor en bases y otros elementos. En la segunda etapa (a la derecha), el efecto fue menor que en la primera, pero notorio. Una parte importante del N aplicado con los lodos es disuelto y lixiviado fuera del suelo, por eso el efecto en la segunda etapa es en parte un menor N residual, probablemente causado por una temperatura ambiental mayor. En los SL se determinaron diferencias poco notorias en N con el control. Este último observó 0,45% de N total y los tratamientos mostraron un rango de 0,45-0,64%, levemente superior, indicando que aún quedan algunos restos de lodos en el estrato superior.

Elementos menos solubles como el P en cambio, permanecen en el suelo enriqueciéndolo, como puede ser observado en la Figura 8.

Otro elemento poco móvil en el suelo, en general, es el Ca que también fue enriquecido a través del lodo de piscicultura en ambos suelos como puede observarse en Figura 9.

Tanto en el SA, como en el SL aumenta el contenido de calcio en el estrato superficial de suelo (0-10 cm), efecto muy favorable para los suelos del sur de Chile, en general pobres en bases disponibles, por el efecto de las altas precipitaciones en esta región.

El Mg presenta una conducta muy similar al Ca, es enriquecido notoriamente en ambos suelos, así como también es lixiviado paulatinamente (no se incluye por este motivo). Los elementos que acusaron un aumento en su oferta en el SA y SL fueron: C, N, P, K, Ca y Mg y en menor medida Fe, S, Mn, Cu, Zn y B.

**Cuadro 5.** Contenidos máximos determinados de los elementos analizados en agua de percolación bajo suelos limosos o arenosos.

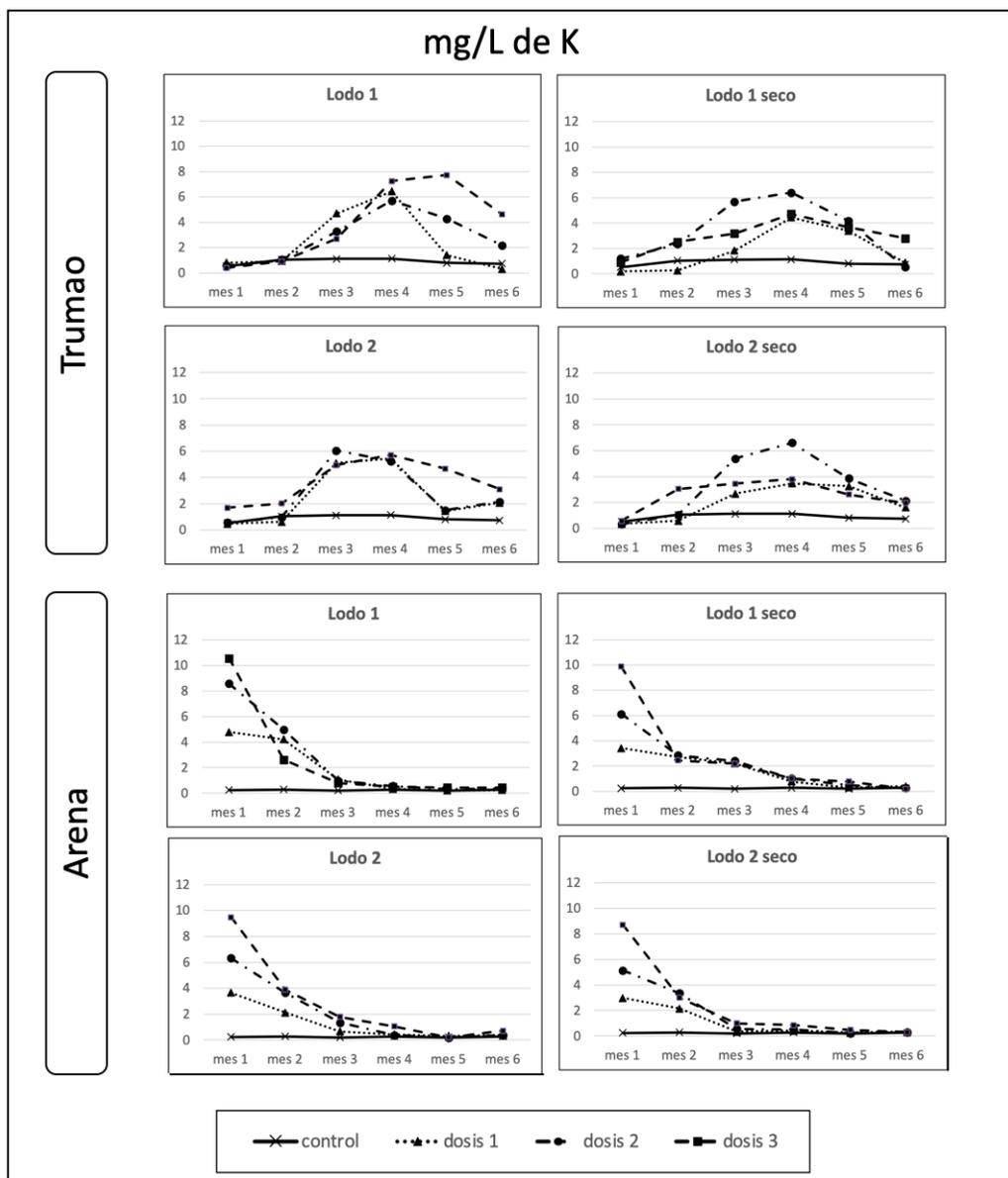
**Table 5.** Maximum contents of certain elements analysed in percolating water under loamy or sandy soils.

Elemento	Tratamiento en que se encontró en máximo	Suelo	Contenido máximo determinado mg L <sup>-1</sup>	Mes de la determinación del valor máximo	Valor máximo INN mg L <sup>-1</sup>
Fósforo	D3	Trumao	0,05	1	Sin valor
	D3	Arena	0,08	1	Sin valor
Azufre	D3	Trumao	3,1	1	250 Riego
	D3	Arena	16,6	1	250 Potable
Sodio	D3	Trumao	14,2	2	Sin valor
	D3	Arena	35,6	1	Sin valor
Potasio	D3	Trumao	7,7	5	Sin valor
	D3	Arena	10,6	1	Sin valor
Calcio	D2	Trumao	29,9	6	Sin valor
	D3	Arena	33,3	6	Sin valor
Magnesio	D2	Trumao	2,98	6	125 Riego
	D3	Arena	11,3	1	125 Potable
Aluminio	D2	Trumao	4,5	1	5 Riego
	D3	Arena	7,6	1	Sin valor
Hierro	D3	Trumao	0,28	1	5 Riego
	D3	Arena	0,35	1	0,3 Potable
Manganeso	D3	Trumao	0,12	1	0,2 Riego
	D3	Arena	0,21	1	0,1 Potable
Cobre	D2	Trumao	0,29	1	0,2 Riego
	D3	Arena	0,75	1	1 Potable
Zinc	D3	Trumao	0,02	1	2 Riego
	D3	Arena	0,02	1	5 Potable

### DISCUSIÓN

El SA, además de presentar una composición granulométrica gruesa, es un material pobre en materia orgánica. Al incorporarle lodo, es favorecido en ella y proporcionalmente en todos los elementos que este contiene. Los sedimentos aluviales cordilleranos y precordilleranos son suelos jóvenes, de material grueso poco meteorizado, que acusan mejor cualquier aporte de elementos más solubles. No así los SL, de sedimentación eólica, más finos y que evolucionaron por mayor tiempo y bajo una exuberante vegetación, dando origen

a los suelos trumao, como el seleccionado en las cercanías de Puerto Fonck y que se distribuyen por toda la región. Los SL presentan a veces más contenido de limo y a veces menos que, por su composición granulométrica, como por su alto contenido de MO, prometen ser un filtro mucho más efectivo que el SA. Ambos tienen una alta permeabilidad al agua, ya que presentan una buena porosidad, especialmente una alta porosidad gruesa (CIREN, 2003). El resto de los indicadores muestra que el SL ofrece una mayor cantidad de nutrientes disponibles que el SA, salvo algunas excepciones, como es el caso de la disponibilidad de P, aunque en ambos esa



**Figura 4.** Tendencia del contenido de K en el agua de lixiviación, bajo 45 cm, de columnas de suelo trumao y suelo arenoso, en comparación a un control (período abril-octubre).

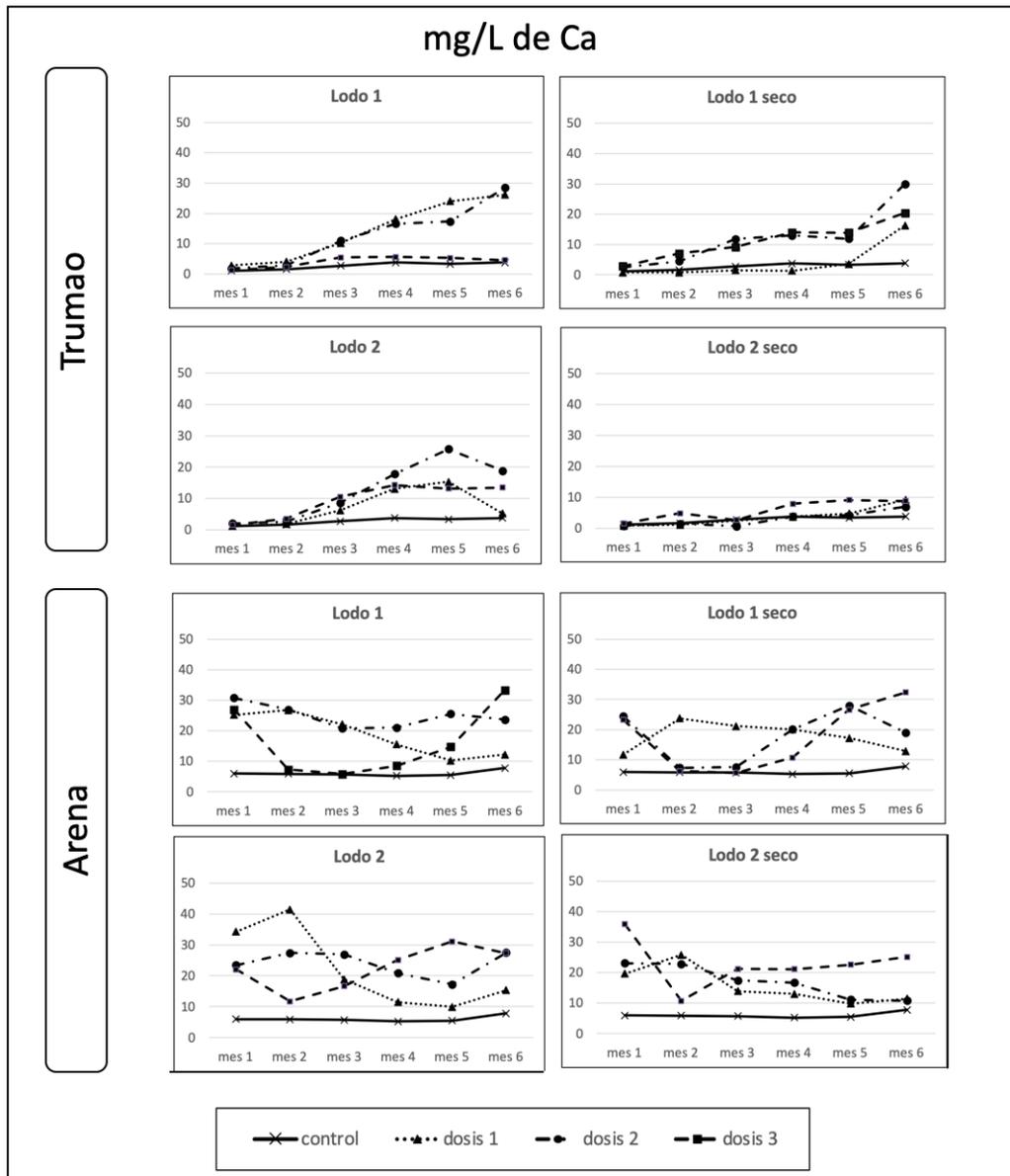
**Figure 4.** K content trend in percolating water under 45 cm, in both silty and sandy soils (april-october).

disponibilidad es baja. El SA muestra un nivel insuficiente de los elementos N, K, Ca y Mg, además de una suma de bases muy baja. Otros elementos muy críticos son el azufre y el boro.

Los lodos de ambos tipos de piscicultura pueden ser clasificados como lodo Clase A, es decir, en principio este tipo de residuo no constituye un riesgo para su aplicación sobre suelos con uso agropecuario (Mada-riaga, 2014). Las diferencias en Na, para los lodos digeridos, se debió a la incorporación de bicarbonato de sodio a los lodos crudos para lograr una mejor digestión anaeróbica. Pero, desde el punto de vista del suelo,

el carbonato de calcio sería más apropiado, ya que el Ca aporta al equilibrio químico del suelo y a su estabilidad estructural (Shanmuganathan y Oades, 1983; Greene *et al.*, 1988; Rowley *et al.*, 2018). En cambio, el Na es un elemento de efecto dispersante. Los lodos presentaron un contenido de 35-70% de MO, es decir constituyen sustancia orgánica que, además, es de fácil descomposición por su relación C/N menor a 20, rica en N.

Los lodos crudos de piscicultura aportan el equivalente a 150-250 kg de nitrógeno total por cada 10 t, o 300-500 kg por cada 20 t, en cambio los lodos de fondo de lago o mar menor al 10% de esa cantidad. El conte-



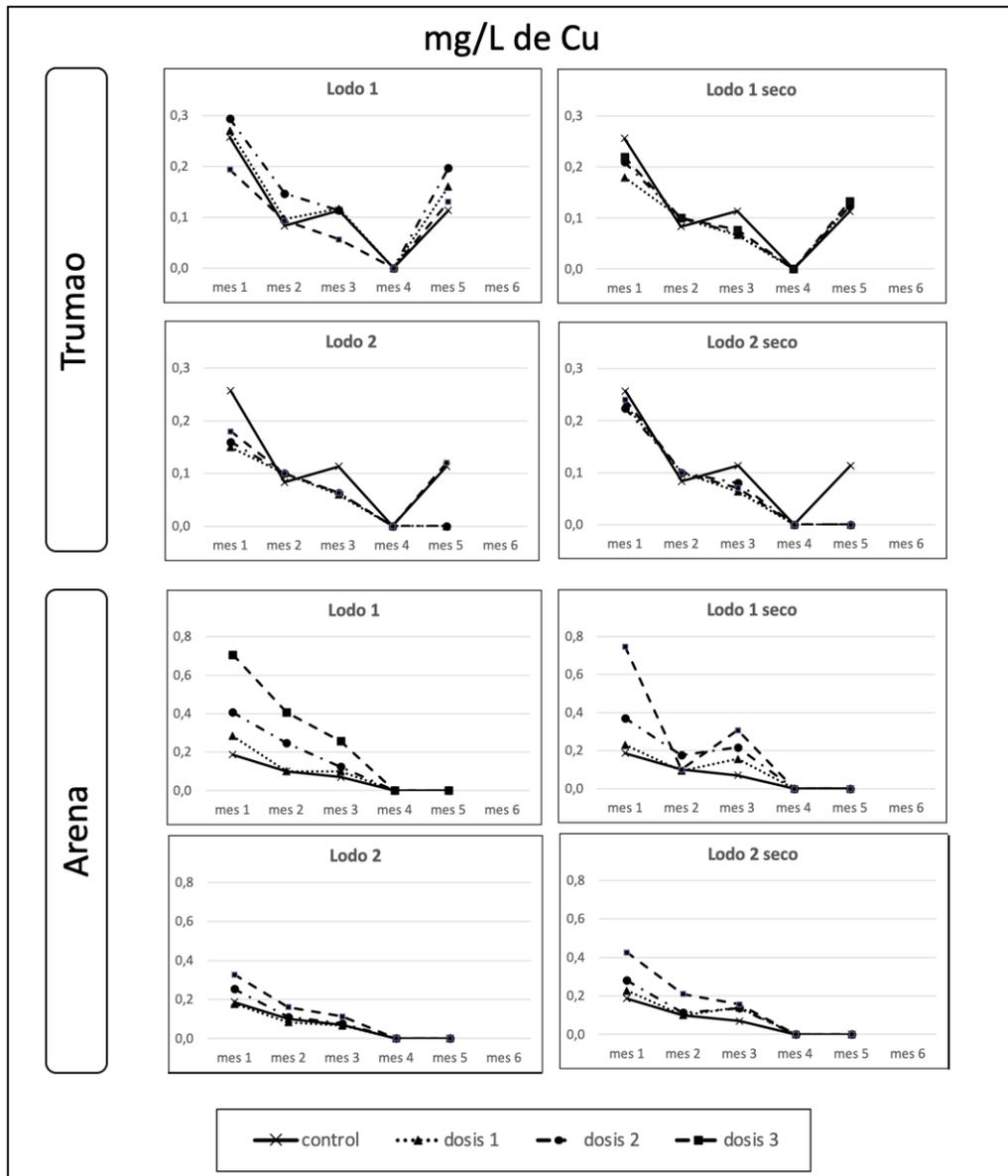
**Figura 5.** Tendencia del contenido de Ca en el agua de lixiviación, bajo 45 cm, de columnas de suelo trumao y suelo arenoso, en comparación a un control (abril-octubre).

**Figure 5.** Ca content trend in percolating water under 45 cm in both silty and sandy soils, compared to a control (april-october).

nido del elemento N entre 8-12% de la sustancia seca, constituye el primer parámetro a ser considerado en el cálculo de la dosis aceptable de lodos de piscicultura en un determinado suelo. En SL la cantidad máxima de lodo crudo (80% de agua) aceptable estaría entre los 20-25 t ha<sup>-1</sup> (300-500 kg N ha<sup>-1</sup>) y en SA como el de este estudio entre 10-13 t ha<sup>-1</sup> (150-225 kg N ha<sup>-1</sup>). De aquí que es sumamente importante verificar el contenido de nitrógeno total (Nt) de los lodos que se desea aplicar. Por supuesto que, si estos lodos se secaran hasta un 20% de humedad, la dosis debería ser propor-

cionalmente menor, ya que permanece la materia seca. Los elementos más restrictivos para la manipulación de este tipo de lodo es su olor nauseabundo y el alto contenido de agua (alrededor de 80%). Ambos pueden ser minimizados al secar estos lodos a un contenido de agua entre 20-30%, pudiendo luego ser perlados para su mayor facilidad de manipulación, envasado, transporte y aplicación.

Los SA, pobres en MO, tienen menor capacidad de retener agua y elementos nutritivos por la falta de partículas finas con alta capacidad de intercambio químico.



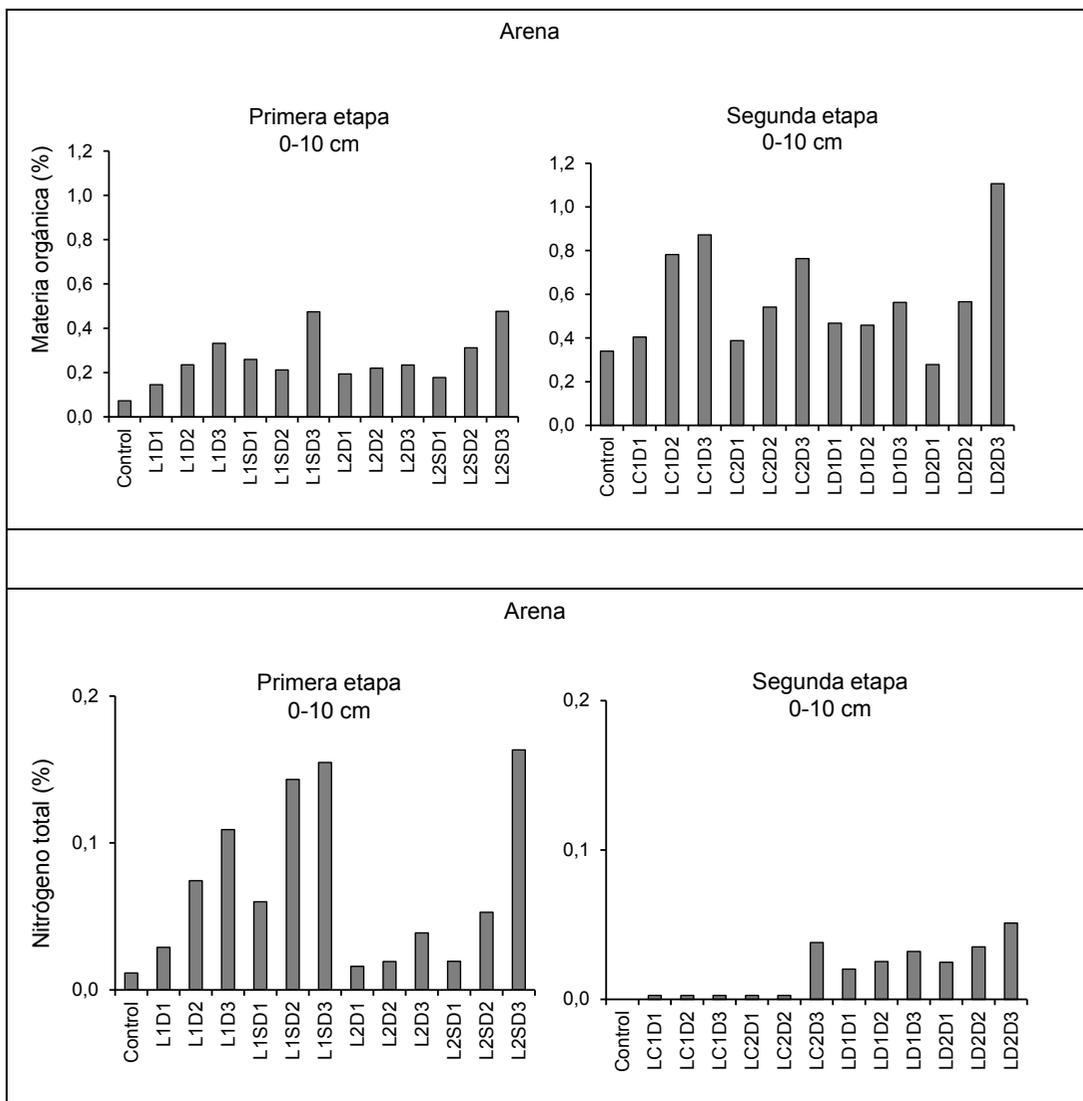
**Figura 6.** Tendencia del contenido de Cu en el agua de lixiviación, bajo 45 cm, de columnas de suelo trumao y suelo arenoso, en comparación a un control (período abril-octubre).

**Figure 6.** Cu content trend in percolating water under 45 cm in both silty and sandy soils compared to a control (april-october).

co, es decir, son menos filtradores. En los primeros tres meses, después de la aplicación de lodos al suelo, con precipitaciones de invierno, ya se lixivia una parte mayoritaria del N soluble que se incorporó en ellos, especialmente en forma de amonio. En cambio, en los SL, más finos y ricos en MO, como los suelos trumao, la lixiviación es más lenta y recién desde el segundo o tercer mes comienza a percolar el N bajo una columna de 45 cm de suelo. Los contenidos de N en los percolados, sin embargo, son menores a los medidos en el primer mes bajo SA, especialmente en su forma amoniacal. Esta dinámica fue experimentada sin una cubierta vegetal activa, de tal forma que, en ambos suelos, la vegetación y el mantillo formado por ésta pueden mejorar la re-

tención de N, especialmente si la aplicación se efectúa en un período en que la actividad metabólica está en ascenso: saliendo del invierno o a inicios de primavera.

El secamiento de los lodos crudos a un contenido de 20-30% de agua, antes de aplicarlos a los suelos, especialmente los SA (Figura 2), mostró que la disolución y la lixiviación del N en forma amoniacal fue menos intensa, en comparación a lo que sucedió con los lodos crudos, sobre todo en los niveles máximos alcanzados, aspecto que en estos suelos es gravitante. De aquí que para suelos de lahares volcánicos o sedimentos arenosos en cajas de ríos, la aplicación de lodos debe ser en dosificaciones muy controladas y estos además deben ser secados a un contenido de agua de alrededor de un 20-30%.



**Figura 7.** Materia orgánica (% , arriba) y nitrógeno total (% , abajo) en suelo arenoso, estrato 0-10 cm, tratado con lodos de piscicultura.

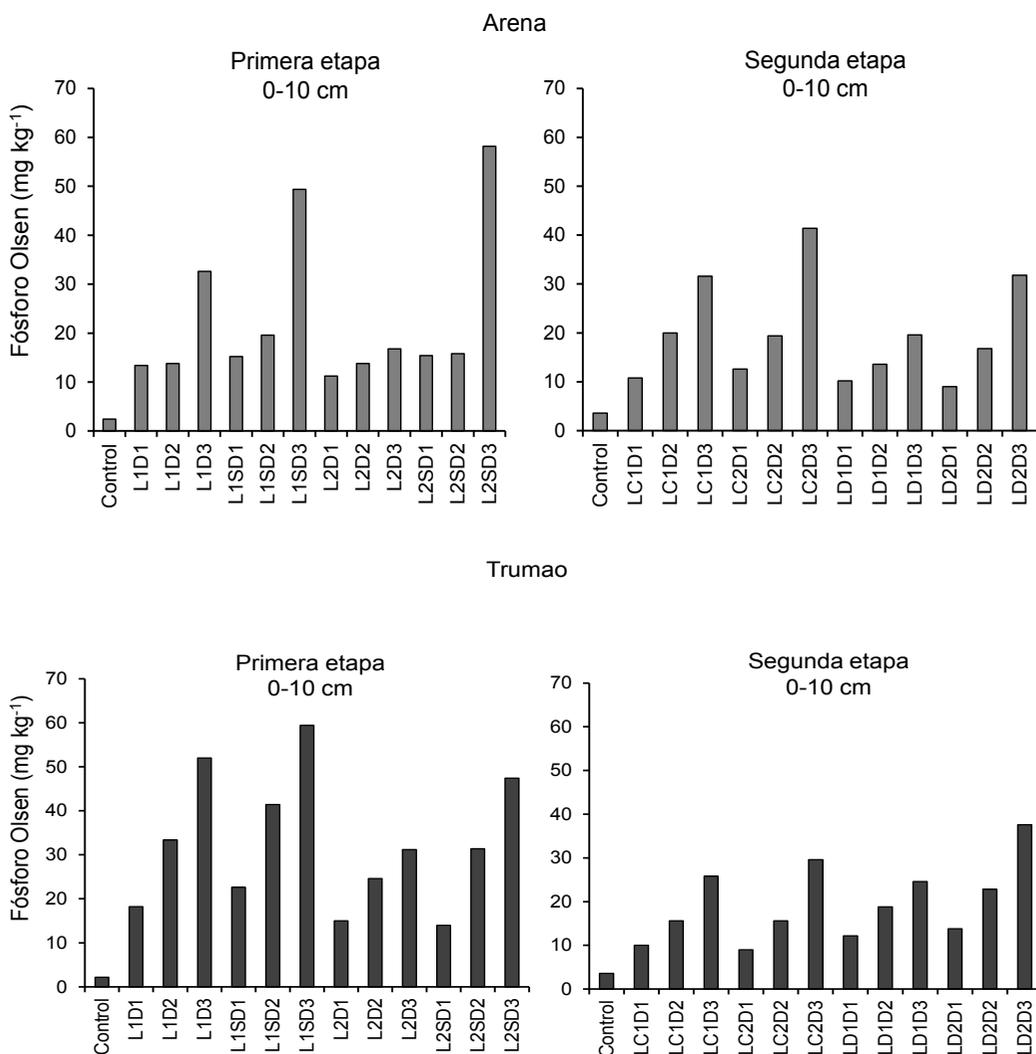
**Figure 7.** Organic matter (% , above) and total nitrogen (% , under) in sandy soil, 0-10 cm layer, treated with fish breeding sludge.

En este ensayo se lixivió agua con elementos disueltos de los lodos a través de una columna vertical de suelo dispuesto bajo techo. El agua que se adicionó para el proceso de lixiviación, imitó cuantitativamente la cantidad de precipitaciones de la zona de Puerto Montt, por lo que representa el efecto de esa condición sobre un suelo de buen drenaje. Este ejemplo, sin embargo, no puede ser aplicado a suelos de drenaje imperfecto o en estado saturado, en los cuales el proceso de lixiviación no es descendente o lateral dentro del perfil, ya que en caso contrario el suelo no ejercería su efecto filtro. En un suelo saturado de agua, como sucede entre junio y noviembre en suelos ñadi, existe la amenaza, principalmente en el caso del N, de que este sea solubilizado y arrastrado superficialmente por el agua, causando con-

centraciones mayores, de efecto tóxico, en hondonadas o en arroyos cercanos. Por otra parte, en suelos de ladera con pendiente superior a un 10-15% (clases IV - VII), existe también la amenaza de procesos de erosión con el riesgo de causar un efecto similar al caso anteriormente indicado.

En suelos saturados existe una amenaza adicional, que es la reducción de los compuestos nitrogenados en un ambiente pobre en oxígeno, con la formación temporal de compuestos tóxicos, y también su volatilización. Por este motivo, la aplicación de lodos de piscicultura no debiera efectuarse en suelos ñadi, turbera y vegas, periódicamente inundables en invierno y primavera.

Los efectos nutritivos de los lodos, en su carácter de abonos orgánicos, son proporcionalmente mayores



**Figura 8.** Fósforo Olsen (mg kg<sup>-1</sup>) en un suelo arenoso (arriba) y uno limoso (trumao, abajo), estrato 0-10 cm, como efecto de lodos de piscicultura.

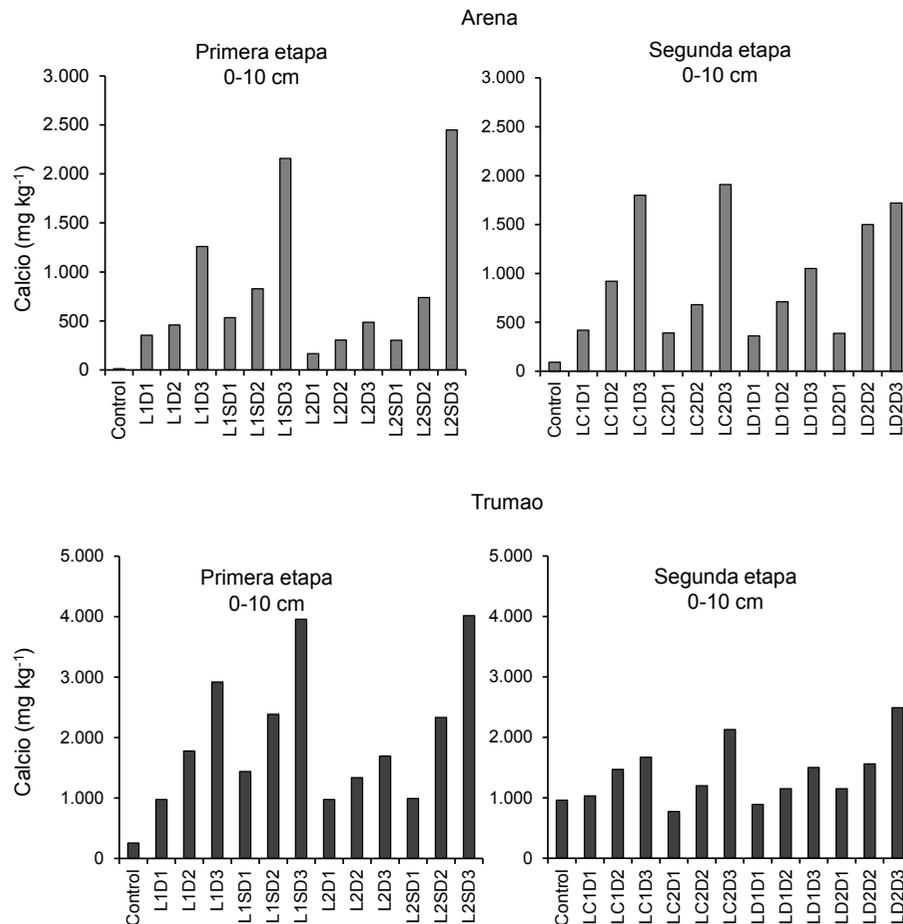
**Figure 8.** Olsen phosphorus (mg kg<sup>-1</sup>) in both sandy (above) and silty (trumao, under) soils, 0-10 cm layer, as a result of fish breeding sludge.

en un SA, pobre en materia orgánica, que en un SL. Los SA presentan menor disponibilidad nutritiva, por la menor superficie específica de sus partículas sólidas y menor solubilidad. Por este motivo la aplicación de lodos, de alta solubilidad en general, es de un alto impacto nutritivo en estos suelos. De hecho, en ellos se logró un aumento notorio de MO, en cambio esto no pudo diferenciarse en los SL, originalmente ricos en materia orgánica en el sur de Chile. A pesar de estas diferencias, el impacto de los lodos de piscicultura en los suelos trumao también fue significativo en casi todos los elementos nutritivos que son importantes para el crecimiento vegetal.

El contenido de N en los lodos de piscicultura es alto, como se indicó anteriormente. Una alta proporción de este N está solubilizado o es soluble, ya que, en el primer mes de aplicación sobre el SA, se detectó la mayor cantidad del elemento en el agua de percolación, principalmente en su forma amoniacal. Este factor pasa a ser así el elemento crítico en lodos de este origen,

obligado a ser considerado en la verificación periódica de sus características, así también en la dosificación a suelos.

Hasta ahora, los ensayos de aplicación de lodos en suelos de cultivo habían recurrido a los lodos de fondo de lago o mar (Pinochet *et al.*, 2001; Salazar *et al.*, 2006; Teuber *et al.*, 2005; Teuber *et al.*, 2007), considerablemente más pobres en N soluble que aquellos de pisciculturas, con seguridad causado por su disolución en el medio acuoso circundante. Efectivamente, en los lodos de piscicultura el Nt se presenta con contenidos entre 7,8-11,5%, base materia seca, en cambio en los lodos de fondo de lagos o del mar se presenta entre 0,4-1% (Salazar *et al.*, 2006) o menos (Teuber *et al.*, 2005). Aun así, con 30 t ha<sup>-1</sup> de lodo de fondo de lago o mar se lograron aumentos significativos en materia seca con balluca (*Lolium multiflorum* L. cv. Sabalan) según Teuber *et al.* (2005), y también se lograron mejores resultados en cultivos de papa (*Solanum tuberosum*), pero con dosis mayores del residuo (50 t ha<sup>-1</sup>) (Teuber *et al.*, 2007).



**Figura 9.** Calcio ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en un suelo arenoso (arriba) y un suelo limoso (trumao, abajo), estrato 0-10 cm, como efecto de lodos de piscicultura.

**Figure 9.** Calcium ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) in both sandy (above) and silty (trumao, under) soils, 0-10 cm layer, as a result of fish breeding sludge.

Con seguridad los lodos de piscicultura, con su mayor contenido de N, podrían ser más eficaces en favorecer el crecimiento, al menos de ballica. Además, al contrario del sedimento proveniente del fondo de lago o mar, los lodos de piscicultura no requieren de una adición de N, por el contrario, este elemento es el que definirá la cantidad posible de aplicar al suelo.

El fósforo (P), que ofrecen los lodos, es un fosfato orgánico que ha demostrado experimentalmente elevar la disponibilidad del elemento a niveles atractivos para la agricultura, en los suelos trumao (Mazzarino *et al.*, 1997; Schlatter *et al.*, 2014). Es un elemento muy poco móvil en el suelo (Ulrich y Khanna, 1969), y por ello experimentó un enriquecimiento significativo, esta vez en ambas clases de suelos. Tanto los SA, como también los SL, fueron enriquecidos pronunciadamente por los aportes de P de los lodos.

El P tipo orgánico de los lodos es más eficiente que aquel de los fertilizantes inorgánicos, tanto como P residual en el suelo, así como también por la proporción en que es absorbido en la biomasa vegetal. La posible adecuación de los lodos crudos a lodos de contenido de agua controlada y en forma perlada, tendría además la ventaja que estas unidades de abono, incorporadas en el suelo, pueden ser rodeadas y colonizadas por las raíces de los vegetales, al ser de efecto biológico neutral, pudiendo así acceder a sus nutrientes en forma directa, disminuyendo la proporción de fósforo fijado en la matriz mineral.

El Ca también es un elemento contenido en los lodos, siendo lixiviado en menor proporción y se acumula en cantidades importantes en el suelo, así que al menos dentro de un par de rotaciones agrícolas su efecto es positivo para el equilibrio químico del suelo. Por este efecto y la adición de otros elementos generalmente limitados en los suelos del sur, los lodos son un abono con alta posibilidad de mejorar la fertilidad de los suelos trumao, ya que además aportan pequeñas, pero decisivas cantidades de Mg, K, S y B. Los suelos agradecen al aporte periódico de abonos que aumenta su disponibilidad nutritiva a favor de los cultivos.

La otra gran ventaja de aplicar lodos de piscicultura en suelos, es que estos pueden neutralizar el olor nauseabundo que presentan estos desechos y que es otro de los problemas importantes en su manipulación. En cambio, en vertederos esto difícilmente se logrará en igual forma. En suelos este factor es neutralizado completamente en un par de meses, cuando es incorporado superficialmente en ellos. El olor, debe ser tratado desde un inicio, a través de la adecuación de los lodos mediante una deshidratación, lo que permite posteriormente una mejor manipulación, almacenamiento, transporte y dosificación al ser aplicado. Con la deshidratación a temperaturas moderadas (40-50 °C), se recupera agua, se controlan eventuales focos infecciosos, se evita la volatilización del N y se neutraliza antes el

olor, es decir, se favorece mucho la aceptación del producto. Por esa vía se asemeja a lo que se conoce como digestión o estabilización y se logran los efectos que se buscan con ella. Lo favorable de una deshidratación, además, es que al incorporarlo al suelo requiere un tiempo mayor para la liberación de sus elementos componentes, dando plazo al cultivo a que germinen y se desarrollen los vegetales que absorberán los elementos nutritivos solubilizados. Por esta vía puede disminuir también la lixiviación cuantitativa del N.

El efecto de los lodos, en las características estructurales del suelo, fueron evaluadas como favorables por Sandoval *et al.* (2010), aunque según esos autores fueron algo menos efectivos que los lodos urbanos. Aun así, el aporte de MO que entregan y sus características de estar bien dotados de bases, especialmente si es calcio y magnesio, es positivo. De aquí se puede inferir, en base a los datos de los autores indicados, que los lodos favorecen la estabilidad estructural de los suelos, incluidos los suelos trumao.

La estrategia para evitar la contaminación de aguas, por los lodos aplicados en suelos, debe considerar diferentes manejos previos o directrices a usar. En primer lugar, se debe dosificar la cantidad de lodo, según la capacidad de retención del suelo y las perspectivas de lixiviación de N. En segundo lugar, debe aplicarse en sólo una fracción de la superficie del territorio y no cubrir más del 50%-60% de él, evitando sectores habitados y cauces de agua, así como también pozos. El secado y perlado por otra parte, disminuye la alta solubilidad del producto, favoreciendo que la vegetación retenga una mayor parte de los elementos nutritivos, lo que finalmente disminuye su lixiviación.

En la región de Los Lagos existe una extensa superficie cubierta por suelos tipo trumao (SL), que deberían sumar unas 520.000 hectáreas, repartidas entre las provincias de Osorno, Llanquihue y Chiloé insular. Para repartir toda la producción de lodos de pisciculturas de esta región, se requerirían unas 500-650 hectáreas cada año. Es decir, en la región existe una capacidad potencial muy superior para recibir esos residuos, en favor de la fertilidad de los suelos y para neutralizarlos como desechos. Si además se considera que se puede repetir la aplicación cada 3-4 años, entonces la holgura es aún mayor. Lo importante es que se desarrolle la tecnología para deshidratar los lodos y el sistema de manipulación de ellos, de tal manera que el producto sea de interés para los agricultores y de un costo menor a cualquier otro tipo de fertilizantes, favoreciéndose así la economía regional.

## CONCLUSIONES

Ambos suelos tratados con lodos de piscicultura logran ganancias positivas de materia orgánica, lo que es especialmente importante en suelos más jóvenes y de

textura gruesa. Por tal vía puede aumentar su capacidad de retención de agua, además, mejora considerablemente su oferta nutritiva.

Dosis iguales o mayores a 25 t de lodos crudos de piscicultura por hectárea entregan percolados con contenidos de N superiores a los que permiten las normas de calidad de agua, en suelos limosos (SL, trumao). En suelos arenosos (SA), con fracciones granulométricas de arena media hacia grava, las dosis de lodos crudos no debieran superar los 10-13 t por hectárea, considerando un contenido de 80% de agua. Este contenido de agua debiera ser minimizado a un 20-30%, pudiendo luego perlar los lodos, para disminuir así su olor nauseabundo y mejorar su manipulación, envasado, transporte y aplicación.

Los lodos son una fuente eficiente de aporte de fósforo disponible, lo que favorece uno de los aspectos más importantes de la fertilidad de los suelos. En su calidad de fósforo orgánico es de más fácil disponibilidad para los microorganismos y los vegetales. La estabilidad de este elemento en los suelos, además, significa que su aporte es a largo plazo.

Entre los elementos destaca el calcio como otro que es aportado por estos lodos. Su efecto en los suelos trumao es especialmente positivo, ya que en suelos utilizados en cultivos agrícolas y el clima del sur, este elemento debe ser adicionado repetidamente para mantener un pH conveniente. Su estabilidad es mayor que el N, pero menor al fósforo, aun así, su efecto puede proyectarse por al menos un par de años.

También aporta distintas cantidades de los demás elementos esenciales, especialmente azufre, magnesio y boro, todos de gran importancia para los suelos trumao. El único elemento no determinado fue molibdeno.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por fondos operativos de FIC-R-Los Lagos, BIP: 30128388-0.

## REFERENCIAS

Association of Official Agricultural Chemist (AOAC), 1984. Official methods of analysis. 14 Ed. Washington, DC, USA.

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), 2003. Estudio Agrológico X Región. Descripciones de Suelos Materiales y Símbolos. Publicación CIREN N° 123, Santiago, Chile.

Chávez, C., Dresdner, J., Figueroa, Y., Quiroga, M., 2019. Main issues and challenges for sustainable development of salmon farming in Chile: a socio-economic perspective. *Reviews in Aquaculture* 11 (2), 403-421.

Fuenzalida, P.H., 1966. Climatología. En: Sagredo, R. (Ed.), *Geografía Económica de Chile*, Corporación de Fomento

de la Producción - CORFO. Santiago, Chile, pp 31-44.

Greene, R. S-B., Rengasamy, P., Ford, G.N., Chartres, C.J., Millar, J.J., 1988 The effect of sodium and calcium on physical properties and morphology of two red-brown earth soil. *European Journal of Soil Science* 39 (4), 639-648.

Instituto de Investigaciones Agropecuaria (INIA), 1985. Suelos volcánicos de Chile. Mapas Geológicos y carta de suelos. Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile.

Lara, A., Solari, M.E., Prieto, M. del R., Peña, M.P., 2012. Reconstrucción de la cobertura de la vegetación y uso del suelo hacia 1550 y sus cambios a 2007 en la ecoregión de los bosques valdivianos lluviosos de Chile (35° - 43° 30' S). *Bosque* 33 (1), 13-23.

Madariaga, S., 2014. Resultados primera etapa proyecto FIC-R-Los Lagos: Tratamiento de lodos residuales de pisciculturas de la región de Los Lagos y evaluación experimental de su desempeño en suelos. Informe al Gobierno Regional de Los Lagos.

Mazzarino, M.J., Walter, I., Costa, G., Laos, F., Roselli, L., Satti, P., 1997. Plant response to fish farming wastes in volcanic soils. *Journal of Environmental Quality* 26 (2), 522-528.

Pinochet, D., Artacho, P., Azúa, P., 2001. Potencialidad como abono orgánico de los desechos sólidos subproductos del cultivo de especies salmonídeas. *Agro Sur* 29 (1), 78-82.

Rowley, M.C., Grand, S., Verrecchia, E.P., 2018. Calcium-mediated stabilization of soil organic carbon. *Biogeochemistry* 137 (1-2), 27-49.

Sadzawka A., Carrasco, M., Grez, R., Mora, M.L., Flores, H., Neaman, A., 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile, Revisión 2006.

Salazar, F.J., Saldana, R.C., 2006. Characterization of manures from fish cage farming in Chile. *Bioresource Technology* 98, 3322-3327.

Sandoval, M.E., Celis, J.H., Stolpe, N.L., Capulín, J.G., 2010. Efecto de enmiendas de lodos urbanos y de salmonicultura en la estructura de un entisol y un alfisol en Chile. *Agrociencia* 44, 503-515.

Schlatter, J.E., Romeny, G., 2014. Cambios experimentados por los lodos y su efecto sobre los suelos. Informe Técnico Final, proyecto FIC-R Los Lagos: Tratamiento de lodos residuales de pisciculturas de la región de Los Lagos y evaluación experimental de su desempeño en suelos. Valdivia, Chile.

Shanmuganathan, R.T., Oades, J.M., 1983. Modification of soil physical properties by addition of calcium compounds. *Australian Journal of Soil Research* 21 (3), 283-300.

Teuber, N., Alfaro, M.A., Salazar, F.J., Bustos, C., 2005. Sea salmon sludge as fertilizer: effects on a volcanic soil and annual ryegrass yield and quality. *Soil Use and Management* 21, 432-434.

Teuber, N., Salazar, F.J., Alfaro, M.A., Valdebenito, A., 2007. Efecto de diferentes dosis de lodo de la crianza de salmones en el cultivo de papa y su efecto residual en balluca anual. *Agricultura Técnica* 67 (4), 393-400.

Ulrich, B., Khanna, P.K., 1969. Ökologisch bedingte Phosphatumlagerung und Phosphatformenwandel bei der Pedogenese. *Flora* 158, 594-602.

## ANEXO

Coefficiente de variación (CV) en determinaciones de N-NH<sub>4</sub>

		Coeficiente de Variación (%)							
		Trumao				Arena			
Tratamiento	Dosis	mes 3	mes 4	Mes 5	Mes 6	mes 3	mes 4	Mes 5	Mes 6
Control		111	55	-	-	35	82	-	-
Lodo 1	D1	29	11	21	16	80	173	-	-
	D2	65	24	20	13	80	139	173	-
	D3	66	52	6	10	27	13	32	40
Lodo 1 seco	D1	47	22	16	26	6	173	39	-
	D2	82	53	11	5	3	62	71	81
	D3	48	19	9	11	29	26	35	34
Lodo 2	D1	35	75	160	173	47	173	38	85
	D2	17	39	74	76	35	173	10	26
	D3	35	23	24	20	18	87	78	106
Lodo 2 seco	D1	17	64	51	42	29	-	19	40
	D2	13	29	37	35	132	173	93	173
	D3	35	36	19	16	49	104	161	167

Coefficiente de variación (CV) en determinaciones de N-NO<sub>3</sub>

		Coeficiente de Variación (%)					
		Trumao			Arena		
Tratamiento	Dosis	mes 4	Mes 5	Mes 6	mes 4	Mes 5	Mes 6
Control		70	70	87	-	49	-
Lodo 1	D1	18	14	5	31	23	18
	D2	44	24	11	16	24	11
	D3	59	31	27	31	31	31
Lodo 1 seco	D1	7	10	4	27	38	38
	D2	45	26	29	20	5	8
	D3	19	20	17	48	19	32
Lodo 2	D1	7	15	19	24	14	16
	D2	20	32	44	4	18	18
	D3	5	35	35	9	18	23
Lodo 2 seco	D1	50	20	14	37	11	0
	D2	8	25	18	32	34	30
	D3	25	37	39	18	19	5

Coeficiente de variación (CV) en determinaciones de K

		Coeficiente de Variación (%)											
		Trumao						Arena					
Tratamiento	Dosis	mes 1	mes 2	mes 3	mes 4	mes 5	mes 6	mes 1	mes 2	mes 3	mes 4	mes 5	mes 6
Control		36	64	63	54	24	29	47	23	43	29	28	32
Lodo 1	D1	43	50	40	7	8	19	23	22	27	55	37	44
	D2	59	70	26	9	29	40	26	56	7	44	55	58
	D3	5	81	79	38	13	22	8	21	4	11	14	10
Lodo 1 seco	D1	62	75	49	41	46	62	18	31	18	49	22	30
	D2	53	75	57	18	32	45	8	13	11	29	45	31
	D3	24	34	33	2	12	9	10	10	10	32	12	19
Lodo 2	D1	97	82	70	10	35	58	29	6	52	40	36	25
	D2	18	12	32	17	49	28	20	40	2	6	17	11
	D3	39	47	34	20	35	50	26	28	18	17	46	46
Lodo 2 seco	D1	8	59	17	33	55	59	5	23	30	26	31	28
	D2	25	85	50	45	55	49	13	39	81	63	4	18
	D3	38	73	38	35	36	39	26	20	47	50	51	27

Coeficiente de variación (CV) en determinaciones de Ca

		Coeficiente de Variación (%)											
		Trumao						Arena					
Tratamiento	Dosis	mes 1	mes 2	mes 3	mes 4	mes 5	mes 6	mes 1	mes 2	mes 3	mes 4	mes 5	mes 6
Control		28	54	100	99	83	85	6	15	14	27	12	8
Lodo 1	D1	76	66	79	58	40	28	47	44	3	21	19	14
	D2	43	42	28	21	19	28	16	119	81	24	29	30
	D3	12	78	119	131	128	127	12	15	49	108	119	43
Lodo 1 seco	D1	10	15	88	15	69	91	4	59	48	11	29	10
	D2	87	98	78	76	59	63	48	7	33	57	6	21
	D3	40	18	19	19	15	24	20	8	31	99	36	21
Lodo 2	D1	28	19	81	82	64	38	45	10	9	19	11	5
	D2	82	68	43	49	62	36	20	56	10	0	13	11
	D3	41	58	79	88	83	80	8	50	34	46	28	17
Lodo 2 seco	D1	35	78	130	91	87	60	11	10	30	17	1	9
	D2	26	72	129	69	68	80	49	63	17	14	24	3
	D3	77	107	81	106	70	94	55	39	79	75	20	20

Coeficiente de variación (CV) en determinaciones de Cu

		Coeficiente de Variación (%)									
		Trumao					Arena				
Tratamiento	Dosis	mes 1	mes 2	mes 3	mes 4	mes 5	mes 1	mes 2	mes 3	mes 4	mes 5
Control		2	7	5	-	10	3	0	25	-	25
Lodo 1	D1	4	6	5	-	6	8	0	0	-	43
	D2	2	55	5	-	3	21	24	20	-	27
	D3	39	12	106	-	54	35	67	8	-	0
Lodo 1 seco	D1	6	0	9	-	5	12	6	7	-	-
	D2	5	0	14	-	5	5	7	5	-	-
	D3	0	0	8	-	9	51	0	4	-	-
Lodo 2	D1	0	0	0	-	14	9	7	9	-	-
	D2	6	0	9	-	13	10	24	15	-	-
	D3	0	0	9	-	8	23	0	18	-	-
Lodo 2 seco	D1	8	0	24	-	50	5	0	12	-	-
	D2	7	0	0	-	0	16	20	4	-	-
	D3	4	0	0	-	87	29	24	13	-	-

