

Propiedades del suelo y sus relaciones con el IS en plantaciones de *Pinus taeda* L. en la Mesopotamia Argentina

Soil properties and their relation to the SI of *Pinus taeda* L. plantations in the Argentine Mesopotamia

Rodolfo A Martiarena ^{1*}, Jorge L Frangi ², Alejandra Von Wallis ¹, Marcelo F Arturi ², Hugo E Fassola ¹, Roberto A Fernández ¹

Palabras clave:

nitrógeno, fósforo, suelos rojos, suelos pedregosos, agua del suelo, subtropical

Keywords:

nitrogen, phosphorus, red soils, stony soils, soil water, subtropics

ABSTRACT

This paper was aimed at establishing the relations between some soil properties and the growth of P. taeda on its main area of commercial plantation in Argentine Mesopotamia. It was hypothesized that main cause of productivity reduction is soil depth and effective plant- available soil volume rather than nutrient content. The study area was located in Corrientes and Misiones provinces from 28° 30' S to 25° 30' S. Thirty-one sites were selected, in all of which: 1- soil samples were obtained for nutrients and bulk density determination, 2- dasometric variables were measured and Site Index (IS) was calculated, and 3- green leaves on trees were sampled for C, N and P content. Statistical analysis was performed using INFOSTAT 2.0. The sites were subdivided in 3 soil-climate groups: 1) sites on northern red soils, 2) sites on northern stony soils, and 3) sites on southern red soils. P. taeda plantation growth was lower (lower IS) in stony soils richer in nutrients with lower effective depth and lower volume with the fine fraction. In the north, the greatest nutrient offer of stony soils compared with red ones did not show a response of increase in foliar nutrient concentration. Both lower water retention and lower soil volume for plant roots were the main growth limiting factors on stony soils. The southern area showed the best growth results (higher IS) on deep red soils with similar concentration and content of nutrients.

RESUMEN

Nuestro objetivo fue establecer la vinculación entre algunas características edáficas y el crecimiento de P. taeda, en su zona de plantación comercial en la Mesopotamia Argentina. La hipótesis es que la causa principal de la reducción del crecimiento de las plantaciones es la profundidad de suelo y el volumen efectivo aprovechable por las plantas, y no el contenido de nutrientes. El trabajo se realizó entre los 28° 30' S, en la provincia de Corrientes, hasta los 25° 30' S, en la provincia de Misiones. Se seleccionaron 31 sitios donde, 1- se tomaron muestras de suelo para determinar nutrientes y densidad aparente, 2- se midieron las variables dasométricas de las plantaciones y se calculó el Índice de Sitio (IS), 3- se tomaron muestras foliares y se analizaron las concentraciones de C, N y P. El análisis estadístico se realizó con INFOSTAT 2.0. Los sitios se asignaron a tres grupos edafoclimáticos: 1) sitios con suelos rojos del Norte, 2) sitios con suelos pedregosos del Norte y, 3) sitios con suelos rojos del Sur. El crecimiento de las plantaciones de P. taeda fue menor (menor IS) en los suelos pedregosos, con más nutrientes, una menor profundidad efectiva y un menor volumen ocupado por la fracción fina. En la zona norte, la mayor oferta de nutrientes en los suelos pedregosos (respecto de los rojos), no resultó en un aumento en la concentración de nutrientes foliares. La menor capacidad de retención de agua y un menor volumen a ser explorado por las raíces de las plantas, constituyeron la principal limitante al crecimiento en los suelos pedregosos. Entre los suelos rojos profundos, de similar concentración y contenido de nutrientes, la zona sur resultó la más favorable para el crecimiento (mayor IS).

¹ INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), Estación Experimental Agropecuaria Montecarlo. Av. El Libertador 2472, 3384 Montecarlo, provincia de Misiones, Argentina

² LISEA (Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales), Facultad de Ciencias Naturales y Museo-Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Diagonal 113 N° 469, 1900 La Plata, provincia de Buenos Aires, Argentina

* Autor para correspondencia: ramartiarena@montecarlo.inta.gov.ar

INTRODUCCIÓN

Pinus taeda L. es la especie forestal con mayor superficie cultivada en el centro norte de la Mesopotamia Argentina, habiéndose adaptado a un amplio rango de condiciones edáficas y climáticas, en el área comprendida, aproximadamente, desde los 25°30'S en la provincia de Misiones hasta los 29° S en la Provincia de Corrientes.

En dicho rango latitudinal, el cultivo con esta especie predomina bajo suelos del orden Kandiuult, conocidos localmente como "suelos rojos". En la actualidad, se está ampliando la superficie de cultivo de esta especie a sitios con diferentes condiciones edáficas, cuyos suelos hacia donde se registra el avance, corresponden taxonómicamente al orden Inceptisol. Los suelos de éste orden son conocidos localmente como suelos "pedregosos" por el elevado porcentaje de fragmentos de roca en su perfil. Estos suelos, se denominan técnicamente "con fragmentos gruesos", cuyo tamaño de fragmentos es > a 2 mm de diámetro y pueden ocupar 35 o 40% del volumen total del suelo (Soil Survey Staff, 2010; Stendahl et al., 2009), o incluso hasta 70% (Eriksson & Holmgren, 1996). Ese elevado porcentaje de la fracción gruesa deja un reducido volumen de suelo con partículas finas (Bornemann et al., 2011) y disminuye la posibilidad de exploración por las raíces.

En la provincia de Misiones, los suelos pedregosos ocupan el 35% de la superficie total de la misma, mientras que los suelos rojos ocupan el 33% (Ligier et al., 1990). Si bien no se cuenta con datos estadísticos, la mayor superficie forestada con *P. taeda* ocuparía suelos rojos.

La diferencia entre los suelos con fragmentos gruesos y los suelos que solo poseen partículas finas (diámetro de partículas < 2 mm) es marcada y reside en las características físicas, químicas y biológicas. La presencia de fragmentos gruesos de roca en el perfil dificultan el laboreo (Cousin et

al., 2003), modifican la porosidad (Shi et al., 2012) y la densidad aparente de la fracción fina (Van Wesemael et al., 2000), y por ende, retienen menor cantidad de agua (Shi et al., 2008; Tetegan et al., 2011; Novák & Knava, 2012). También, la presencia de fragmentos gruesos en el perfil modifica la temperatura (Danalatos et al., 1995; Casals et al., 2000) y las condiciones biológicas (Certini et al., 2004), afectando el contenido de nutrientes (Agnelli et al., 2001; Bornemann et al., 2011; Rau et al., 2011). Algunos estudios indican que los fragmentos rocosos son químicamente activos y liberan nutrientes (Martín-García et al., 1999; Heisner et al., 2004; Whitney & Zabowski, 2004; Rytter, 2012), y que los suelos con fragmentos gruesos contienen, en algunos casos, más carbono orgánico y consecuentemente mayor actividad biológica (Agnelli et al., 2001; Cerdá et al., 2001); no obstante, no todas las litologías presentan estas características (Cuniglio et al., 2009). Asimismo, se sabe que las variaciones en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, impactan sobre el crecimiento del cultivo (Bellote et al., 2005; Hope et al., 2007). Las relaciones entre propiedades del suelo y el crecimiento de *P. taeda* no son conocidas en la región comprendida por éste trabajo, debido a que, si bien hay plantaciones sobre los sitios con suelos pedregosos, no se dispone de datos de crecimiento arbóreo.

Cabe asimismo destacar que, independientemente de las condiciones edáficas del sitio, las tareas que se realizan durante el ciclo forestal incluyen aquellas para el establecimiento de la plantación, el manejo de la densidad, la poda y la cosecha. Desde el punto de vista nutricional, el establecimiento de la plantación y la cosecha, son las actividades de mayor impacto sobre el sitio (Martiarena et al., 2009), principalmente, el manejo de los residuos para el establecimiento del nuevo cultivo. La conservación de residuos de cosecha predomina en los sistemas de preparación de terreno, no obstante, la reposición nutricional mediante fertilización no se realiza, al menos en plantaciones de

P. taeda, por lo cual el crecimiento actual de estas plantaciones se debe a las condiciones propias del sitio.

Al comparar el crecimiento de *P. taeda* en la región Mesopotámica Argentina con otras regiones donde se cultiva esta especie, puede observarse que el AB a los 20 años de edad de las plantaciones de *P. taeda* en Argentina, mencionados por Pinazo *et al.* (2007), es similar a la que se obtiene en EEUU (Jokela *et al.*, 2004); no obstante, es la mitad de los 103 m².ha⁻¹ de Hawaii (Harms *et al.*, 2000). Estas diferencias probablemente se deban en parte a factores ecológicos cuyo estado difícilmente pueda cambiarse; sin embargo, también es posible suponer que *P. taeda* responde ante los cambios en la disponibilidad de recursos cuyo estado sí puede modificarse tanto en sentido positivo como negativo. Igualmente, estas comparaciones exigen la máxima ocupación de sitio, situación difícilmente replicable en plantaciones comerciales; por ello, las comparaciones deben realizarse con variables que expresen el potencial de crecimiento de cada sitio y se independicen del manejo a lo largo de la rotación, tal como el índice de sitio (IS).

Es probable que las diferencias de crecimiento entre plantaciones de regiones alejadas con diferencias ecológicas, también ocurran a escala zonal y local en tanto se constate cierta heterogeneidad de sitios. Por ello, el objetivo de éste estudio es verificar si existe vinculación entre algunas características de los suelos de la zona de plantación comercial de *P. taeda* en la Mesopotamia Argentina con los valores del crecimiento de dichas plantaciones, empleando variables indicadoras del potencial de crecimiento no afectadas por el manejo tal como el IS. La hipótesis de este trabajo es que la causa principal de la reducción de la calidad de sitio, y por ende del crecimiento potencial de las plantaciones de *P. taeda*, es la profundidad de suelo y el volumen efectivo aprovechable por las plantas, y no el contenido de nutrientes allí presente.

METODOLOGÍA

Caracterización de la zona de estudio y las plantaciones

El trabajo se realizó en las provincias de Corrientes y Misiones, República Argentina, ubicadas aproximadamente entre los 25°S a 31° S, y 54°O a 60° O. Las plantaciones estudiadas se hallaban ubicadas entre los 28° 30' S, en la Provincia de Corrientes, hasta los 25° 30' S, en la Provincia de Misiones.

Las precipitaciones medias anuales en el sur de la zona de estudio (departamento Santo Tomé, provincia de Corrientes), son de aproximadamente 1450 mm para los diferentes períodos de los que se tienen registros; la temperatura media anual es de 20° C (ECOS / GEF-PNUD, 2002). En el Norte de la zona de estudio la precipitación media anual es de 2000 mm, y la temperatura media anual es de 20° C (Ligier, 1990). Ambas zonas corresponden a la Zona de Vida Bosque Subtropical Húmedo según Holdridge (1967).

Se seleccionaron 31 rodales de *P. taeda* entre 3 y 25 años de edad, de material genético desconocido, con diferentes manejos silviculturales (densidad del rodal) y sobre 2 grupos de suelo. El primero de los grupos de suelo es conocido localmente como "suelos rojos" y comprendido en los órdenes taxonómicos Ultisoles, Oxisoles y Alfisoles (Soil Survey Staff, 2010). Estos suelos se caracterizan por un desarrollo en profundidad mayor a los 2 m, con una secuencia de horizontes A-AB-Bt-C, de color rojo, libre de pedregosidad y fragmentos gruesos, permeabilidad moderada y bien drenados. El segundo grupo es conocido como "suelos pedregosos" y pertenecientes taxonómicamente a los órdenes Inceptisoles, Entisoles y Molisoles. Estos suelos se caracterizan por poseer limitantes físicas debido a la presencia de fragmentos gruesos y piedras, con elevada infiltración, secuencia

de horizontes A-AC-C y, en general, de desarrollo vertical somero, aunque puede variar desde pocos centímetros hasta 1 m de profundidad (Soil Survey Staff, 2010). Se considera fragmentos gruesos aquellos que superan los 2 mm hasta 25 cm de diámetro, mientras que piedra son las que superan los 25 cm de diámetro (Etchevehere, 1976)

Los 31 rodales se congregaron en 3 grupos de acuerdo a la regionalización y el tipo de suelo. En la zona norte de la región de estudio se localizaron dos grupos y uno en la zona sur. Este último comprendió todos los rodales de la zona sur, ya que todas las plantaciones fueron establecidas sobre suelos rojos (Ros) y en la actualidad son raros los rodales de *P. taeda* sobre otros tipos de suelo. En la zona norte del estudio los rodales fueron divididos de acuerdo al tipo de suelo, con un grupo establecido sobre suelos rojos (Ron), y el otro grupo sobre suelos pedregosos (Pe).

La estructura de cada uno de los 31 rodales se caracterizó por medio de 3 parcelas de 600 m². En cada parcela se realizó un inventario de DAP (diámetro del tronco medido a 1.30 m de altura) con forcípula, cuyo número varió de 100 árboles en plantaciones de 3 años de edad (aún sin raleos) hasta 15 árboles en plantaciones de 20 años de edad con 3 o 4 raleos a lo largo de la rotación. A partir del DAP se calculó la Ht (altura total) de cada uno de los árboles plantados de la parcela por medio de los modelos de Ht ajustados para el simulador forestal (Crechi *et al.*, 1999), siendo ellos:

- Clase de edad 2 a 6 años

$$Ht = (7.46994 + 1.18064 * edad) * (1 - (1.11847 - 0.0608534 * edad) * \exp(-0.0643616 * DAP))$$

Para el ajuste de este modelo se utilizaron 1944 pares de datos altura/DAP entre 3 y 6 años, siendo los diámetros y alturas mínimos y máximos respectivamente 4 y 24 cm y 2 y 15 metros, cuyo muestreo incluyó parcelas en diferentes sitios.

-Clase de edad 7 a 30 años

$$\ln(Ht) = 3.83321 - \frac{9.309495}{DAP} - \frac{8.011572}{edad} + \frac{36232282}{* edad} (DAP)$$

La base de datos empleada para la construcción del modelo de clase de edad 7 a 30 años estuvo constituida por 6983 pares de datos altura/DAP, comprendiendo rangos diamétricos entre 5 y 65 cm y altura entre 5.5 a 36 m.

Como estimador del potencial de crecimiento se utilizó el IS. Para determinar el IS de cada rodal se utilizó el modelo aplicado en el simulador forestal (Crechi *et al.*, 1999). El mismo fue:

$$IS = Hi * \left(\frac{1 - \exp(-0.0849947 * Eo)}{1 - \exp(-0.0849947 * Ei)} \right)^{1.1589676}$$

Donde:

IS: índice de sitio (m)

Hi: altura media dominante (m) $i = 17, \dots, 28$

Eo: 15 años, edad de referencia para la cual se calculó el IS

Ei: edad del rodal (años)

En la Tabla 1 se pueden observar las características estructurales de cada uno de los rodales donde se efectuaron muestreos, la edad y el tipo de suelo en el cual crecieron.

Muestreo y contenido de nutrientes en el suelo

Para cada uno de los 31 rodales descriptos se determinaron las propiedades químicas y densidad aparente del suelo. En los sitios con suelos rojos, la determinación de las propiedades químicas se realizó por medio de muestras obtenidas con barreno por horizonte hasta los 60 cm de profundidad las cuales fueron compuestas extrayendo 10

Rodal	Edad	Suelo	Latitud	N	IS	DAP	Ht	AB	V
1	3	Ron	26°59'40"	857	22.2	9.12	5.27	5.64	15.71
2	3	Ron	26°00'25"	1130	22.5	7.77	4.72	5.66	14.95
3	3	Pe	26°34'56"	1400	21.7	4.28	4.02	2.25	4.02
4	3	Pe	26°36'06"	1028	22.4	6.41	4.06	3.57	8.32
5	3	Ron	25°59'52"	1513	22.2	6.69	4.82	5.92	16.02
6	3	Ros	28°13'24"	1350	22.8	7.91	4.78	6.95	18.48
7	5	Ron	26°59'52"	417	22.8	15.65	9.38	8.07	38.05
8	5	Ron	26°00'35"	1400	24.6	13.34	8.61	21.23	97.96
9	5	Ros	28°24'51"	950	23.5	14.75	9.08	16.84	78.77
10	7	Ron	26°59'54"	427	21.2	19.83	11.93	13.22	77.57
11	7	Ron	26°02'03"	470	21.5	20.17	11.95	15.31	90.32
12	7	Pe	27°10'54"	1264	20.7	14.05	10.56	20.40	111.98
13	7	Ron	26°32'00"	600	25.7	20.3	14.5	20.08	141.70
14	7	Ros	28°26'36"	625	21.3	18.82	11.70	17.92	104.50
15	10	Ron	26°58'47"	213	26.0	35.19	21.81	22.50	230.92
16	10	Pe	26°31'17"	275	20.4	24.42	14.28	13.05	89.60
17	10	Pe	26°31'24"	491	23.9	22.40	16.30	20.15	156.40
18	10	Pe	26°07'15"	600	20.5	21.90	14.57	23.05	161.80
19	10	Ros	28°12'55"	750	22.6	25.72	16.51	40.21	321.35
20	10	Pe	27°10'44"	740	22.2	23.10	16.08	32.02	250.01
21	13	Ron	26°30'33"	483	23.7	25.90	21.70	25.63	255.40
22	16	Ros	28°24'12"	1056	25.2	26.40	25.40	56.60	704.44
23	16	Ros	28°24'09"	759	25.9	26.10	25.50	38.90	483.03
24	16	Ros	28°24'07"	722	25.1	26.50	24.70	38.10	482.24
25	18	Ron	26°30'36"	300	23.2	32.2	25.0	28.70	332.25
26	19	Pe	26°37'09"	172	17.9	38.3	19.4	20.32	190.64
27	20	Pe	26°08'59"	150	24.4	46.81	27.97	25.64	365.20
28	20	Pe	26°36'06"	225	20.5	38.28	22.81	26.60	313.61
29	20	Pe	26°34'56"	271	21.7	37.64	22.78	30.38	276.97
30	23	Ron	25°58'41"	752	24.6	32.04	28.90	51.53	686.73
31	25	Ron	26°04'32"	238	22.3	39.11	27.35	29.14	403.47

N: densidad del rodal (pl.ha⁻¹); IS: índice de sitio (m); DAP: diámetro medio del rodal a 1,30 m (cm); Ht: altura total media del rodal (m); AB: área basal (m².ha⁻¹); V: volumen total actual del rodal (m³.ha⁻¹); Ron: suelo rojo de la zona norte; Ros: suelo rojo de la zona sur; Pe: suelo pedregoso.

Tabla 1. Características estructurales de las plantaciones de *P. taeda* y condiciones de sitio en cada rodal de muestreo.

Table 1. *Pinus taeda* plantation structure and site conditions at each sampled stand

muestras simples en los horizontes A y AB, mientras que en el horizonte Bt se obtuvieron 5 muestras simples (Fernández *et al.*, 2000). La profundidad de muestreo para el horizonte A fue de 0-10 cm, el Horizonte AB de 10-30 cm y el horizonte B de 30 hasta 60 cm, siendo la profundidad efectiva de estos

suelos, mayor a los 2 m de profundidad. Para determinar propiedades químicas en los suelos pedregosos el muestreo alcanzó, en algunos casos, solo hasta los 30 cm de profundidad, ya que la pedregosidad fue una limitante física para realizarlo a mayor profundidad, coincidiendo con la profundidad

efectiva en esos sitios. El muestreo en el horizonte A se realizó de 0-10 cm, mientras que en el horizonte AC se lo hizo de 10-30 cm. En los casos en que la pedregosidad lo permitió y la profundidad efectiva del suelo fue mayor, el muestreo se extendió en parte del horizonte C hasta los 60 cm de profundidad. En cada una de estas muestras compuestas, tanto las de suelos rojos como las de suelos pedregosos, se determinó el pH actual, carbono orgánico, nitrógeno total, fósforo y potasio disponible, calcio, magnesio intercambiable, Fe, Mn y Zn (Jackson, 1964).

Para determinar densidad aparente del suelo se aplicaron dos métodos de acuerdo al tipo de suelo. Para suelos rojos se aplicó el método del cilindro (Forsythe, 1975) y se extrajeron, en cada rodal, 8 muestras individuales en los espesores 0-10 y 10-30 cm, mientras que del espesor 30-60 cm se obtuvieron 5 muestras individuales (Fernández *et al.*, 2000). Las muestras se llevaron a laboratorio y se secaron a 105°C hasta peso constante, calculando la densidad aparente como la relación entre la masa de suelo y el volumen total, o sea el volumen de partícula más el espacio entre ellas:

$$Da = Ms/Vt$$

Donde:

Da: densidad aparente del suelo en g.cm⁻³

Ms: masa de suelo en g

Vt: volumen total en cm³

En suelos pedregosos la densidad aparente se determinó por medio del método del pozo (USDA, 1999). En cada rodal, en los espesores 0-10 y 10-30 cm de suelo se realizaron 8 muestras simples, mientras que en los sitios que se efectuó muestreo entre 30 y 60 cm de espesor se obtuvieron 5 muestras simples. Para cada una de las determinaciones simples se realizó un pozo de aproximadamente 2000 cm³ extrayendo la totalidad del material contenido en el mismo. Posteriormente se realizó la cubicación del pozo con arena contenida en una probeta graduada,

obteniendo por diferencia el volumen del pozo. Esta cubicación debió realizarse con arena por la pendiente del terreno que no permitió efectuarla con agua. El material extraído del pozo se secó a 105°C y luego se separó la fracción fina del suelo del resto con tamiz de 2 mm, para finalmente pesar la fracción fina. La fracción gruesa se separó en raíces y material consolidado mayor a 2 mm, cubicándolo en una probeta graduada por separado. La cubicación se efectuó rellenando los espacios vacíos con arena, ya que el material proveniente del basalto con alto grado de descomposición por meteorización química, se degrada rápidamente en contacto con el agua y no permite obtener el volumen real de piedras en el suelo. Luego de ello la densidad aparente del suelo se calculó con la misma fórmula expresada para suelos rojos, siendo Ms la masa de suelo de la fracción fina, mientras que Vt es la diferencia de volumen entre el volumen total del pozo obtenido en campo menos el volumen de la fracción gruesa (material mayor a 2 mm + raíces).

El contenido de cada uno de los nutrientes, para los cuales se determinó la concentración, se calculó hasta los 60 cm en suelos rojos, mientras que en suelos pedregosos hasta la profundidad que pudo hacerse el muestreo, la cual varió entre 30 cm y 60 cm. Para cada uno de los nutrientes el contenido fue calculado como la sumatoria de los productos de la densidad aparente por la concentración respectiva de cada elemento en cada horizonte.

Determinación de la concentración foliar de nutrientes

En cada uno de los 31 sitios se extrajeron muestras foliares de 6 árboles seleccionados proporcionalmente de acuerdo con su distribución diamétrica, cuyas muestras se constituyeron con hojas de distintas posiciones de la copa del árbol. Las muestras obtenidas fueron secadas a 70°C a peso constante, molidas y pasadas por tamiz con malla de 0.5 mm. Se obtuvieron alícuotas para los análisis químicos. La concentración

de C y N se determinó con un analizador LECO CNS-2000, mediante el método de combustión seca (Tabatabai & Bremner, 1991). La concentración de P se realizó con un espectrómetro de emisión de plasma usando un ICP-AES (Johnson & Ulrich, 1959)

Análisis de datos

Se efectuaron análisis de correlación simple entre el IS obtenido para cada uno de los rodales y la concentración de nutrientes por espesor de muestreo de suelo, como así también con el contenido de nutrientes. También, se realizó ANOVA y test de Tukey para las concentraciones y contenidos de nutrientes en el suelo y la concentración foliar de C, N y P del estrato arbóreo entre los agrupamientos. Para ambos análisis se utilizó el paquete estadístico INFOSTAT 2.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración de nutrientes en el suelo

La concentración de nutrientes en el suelo, promedio de todos los sitios agrupados bajo las mismas características edafoclimáticas y para cada horizonte, fue mayor en los sitios con suelos pedregosos, respecto de los sitios con suelos rojos, excepto el micronutriente Fe (Tabla 2), donde también puede observarse que los coeficientes de variación entre sitios fueron relativamente elevados.

En el espesor de suelo 0-10 cm, P, K y Zn fueron los 3 elementos con mayor diferencia de concentración entre los sitios de suelos pedregosos y los sitios de suelos rojos de ambas regiones. La concentración promedio

Espesor (cm)	Grupo*	Concentración de nutrientes (ppm)								
		C	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Fe
0-10	Ron	23170 (19) a	1925 (31) a	2.8 (66) a	94 (38) a	195 (66) a	998 (52) a	105 (69) a	3.2 (148) a	77 (144) a
	Pe	45860 (13) b	3828 (24) b	11.6 (66) b	357 (82) b	498 (44) b	2761 (23) b	364 (34) b	9.1 (40) b	32 (50) a
	Ros	26990 (16) a	1575 (26) a	2.2 (38) a	92 (41) a	235 (81) a	1193 (32) a	163 (38) a	1.5 (31) a	109 (145) a
10-30	Ron	17040 (25) a	1285 (27) a	1.9 (77) ab	78 (36) a	144 (69) a	882 (49) a	98 (70) a	2.9 (166) ab	78 (192) a
	Pe	24390 (26) b	2341 (30) b	6.8 (106) b	263 (91) b	448 (56) b	2237 (25) b	218 (32) b	4.4 (34) b	26 (67) a
	Ros	21170 (13) ab	1189 (17) a	1.5 (86) a	86 (39) a	188 (101) a	1231 (18) a	123 (42) a	1.0 (10) a	27 (78) a
30-60	Ron	12510 (25) a	1058 (37) a	1.2 (58) a	82 (34) a	99 (63) a	914 (50) a	82 (112) a	1.6 (105) ab	35 (160) a
	Pe	16910 (58) a	1298 (64) a	7.3 (84) b	252 (52) b	568 (64) b	2267 (19) b	181 (33) b	3.2 (67) b	14 (42) a
	Ros	16680 (13) a	947 (18) a	0.7 (56) a	73 (38) a	95 (29) a	949 (13) a	52 (54) a	0.6 (22) a	8 (30) a

*Ron: suelo rojo zona Norte; Pe: suelo pedregoso; Ros: suelo rojo zona Sur. n = 14 (Ron), 10 (Pe) y 7 (Ros). Entre paréntesis coeficientes de variación. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) del valor medio de concentración, entre grupos.

Tabla 2. Concentración promedio de nutrientes del suelo (ppm) de cada uno de los agrupamientos de rodales.

Table 2. Mean concentration of soil nutrients (ppm) for each stand groupement

de P, K y Zn en suelos pedregosos respecto de suelos rojos, fue respectivamente 4.8, 3.8 y 4.4 veces superior. Para el resto de los elementos, en general la concentración de nutrientes en suelos pedregosos, duplicó la concentración encontrada en suelos rojos.

También en el espesor 10-30 cm, el P, K y Zn presentaron mayor concentración en suelos de sitios pedregosos, con 4.0, 3.2 y 3.0 veces superior respectivamente, de acuerdo con el promedio de ambas zonas con suelos rojos.

En el espesor 30-60 cm, la diferencia de concentración se acentuó aún más en suelos pedregosos respecto de los suelos rojos, siendo en este caso el P, Mg y Zn los 3 elementos de mayor diferencia, los cuáles superaron respectivamente en 8.7, 5.9 y 3.9 veces la concentración en sitios con suelos rojos. El K también mantuvo la tendencia encontrada en los anteriores horizontes, solo que no se ubicó entre los 3 elementos de mayor diferencia.

La mayor concentración de nutrientes en los suelos pedregosos es coincidente con el trabajo realizado por Bellote *et al.* (2005), quienes compararon suelos rojos y pedregosos en Brasil. Los suelos pedregosos son considerados como menos evolucionados respecto de los suelos rojos (Cocos, 1997), situación que responde principalmente a los procesos de formación a través de la meteorización y liberación de nutrientes de los clastos gruesos, lo que genera, por esa vía, mayor aporte de nutrientes (Whitney & Zabowski, 2004; Rytter, 2012). Walker & Syers (1976) han señalado que los materiales recientemente depositados, en su caso cenizas volcánicas, y por extensión los más recientemente expuestos a la meteorización como los fragmentos gruesos de rocas basálticas en Misiones, tienen el mayor contenido de nutrientes derivados de las rocas, como P, de los que ellos alguna vez podrán tener. Por lo tanto cabe esperar, como ocurre en éste estudio, que los suelos menos evolucionados, como los pedregosos puedan ofrecer un alto suministro de esos nutrientes a las plantas (Vitousek & Farrington, 1997). Sin

embargo, a través del tiempo la cantidad de P en el ecosistema completo debería declinar (Vitousek, 2004), lo que se observa, en éste estudio, en los suelos rojos más antiguos. Por el contrario, debido a que el N está ausente en la mayoría de los sustratos primarios, su abundancia dependerá de la acumulación por medio de la fijación biológica y la deposición atmosférica a través del tiempo (Walker & Syers, 1976; Vitousek, 2004). En las condiciones subtropicales misioneras que favorecen el rápido crecimiento de la vegetación espontánea y la acumulación de materia orgánica y N en el suelo, han permitido estimar en 10 a 12 años después del abandono del uso agrícola de la tierra, el tiempo necesario para que se recuperen los contenidos de MO, N y la densidad aparente anteriores a la conversión de uso de la tierra; y en unos 16 a 20 años el tiempo de recambio de la vegetación nativa boscosa (cf. Píccolo *et al.*, 2002; Váccaro *et al.*, 2003; Frangi *et al.*, 2004). Estas observaciones permiten sugerir que la elevada concentración de MO y N en los suelos pedregosos podría estar relacionada con el rápido crecimiento y aportes al mantillo y horizontes del suelo de toda la vegetación espontánea como respuesta a la mayor oferta de nutrientes en los primeros centímetros de suelo.

La tendencia no significativa de menor concentración de hierro en suelos pedregosos, probablemente también tenga que ver con el menor tiempo de evolución de estos suelos, ya que la evolución de suelo en regiones tropicales va acompañada de un enriquecimiento relativo con óxidos de hierro con pérdida de sílice (Porta *et al.*, 2003).

Densidad aparente del suelo

La densidad aparente promedio, en los dos horizontes superficiales, fue significativamente menor en los sitios de suelos pedregosos respecto de los sitios con suelos rojos, mientras que también las diferencias fueron significativas entre ambos agrupamientos de suelos rojos. Los suelos

Ron, Pe y Ros presentaron, respectivamente, densidades de 1.32 (± 0.10), 1.14 (± 0.15) y 1.56 (± 0.08) g.cm⁻³ en el espesor 0-10 cm, de 1.31 (± 0.12), 1.13 (± 0.17) y 1.67 (± 0.11) g.cm⁻³ en el espesor 10-30 cm, mientras que en el espesor 30-60 cm fue de 1.30 (± 0.09), 1.23 (± 0.15) y 1.68 (± 0.07) g.cm⁻³, con diferencias significativas solo en el agrupamiento Ros respecto de los dos restantes. Más allá de que éstos valores son inferiores a los sitios con suelos rojos, aún son superiores a trabajos realizados en suelos someros de otras regiones (Cruz-Flores & Etchevers-Barra, 2009), mientras que la tendencia de menor densidad aparente en suelos pedregosos, es coincidente con los resultados de Bellote *et al.* (2005).

La menor densidad aparente en los suelos pedregosos es consecuencia de una suma de factores, no obstante, en el presente trabajo se puede observar que los suelos pedregosos poseen, en el horizonte superficial, mayor concentración de MO respecto de los suelos rojos y con una notoria disminución hacia los horizontes más profundos. La mayor presencia de MO en el horizonte superficial hace suponer mayor presencia de raíces en menor volumen explorable, tendencia coincidente con lo citado por Cerdá (2001).

La diferencia entre los valores promedio de los sitios de suelos rojos, probablemente sea consecuencia del uso anterior del terreno, ya que en la región sur, si bien no se tiene precisión del uso anterior de los sitios estudiados, la región posee mayor actividad ganadera, actividad que podría haber producido, mediante pisoteo, el aumento de la densidad del suelo.

La presencia de fragmentos gruesos y piedras en el perfil de los suelos pedregosos varió entre 5 y 56% del volumen total del suelo hasta los 30 cm de espesor, rango de valores característicos de este tipo de suelos (Soil Survey Staff, 2010; Stendahl *et al.*, 2009). A partir de los 30 cm de espesor, en 4 de los sitios la presencia de una capa rocosa continua impidió el muestreo de suelo, lo que se conoce localmente como "planchón" y que en la mayoría de los casos las raíces de las plantas no pueden atravesar.

Contenido de nutrientes en el suelo y sus relaciones

En la Tabla 3 se puede observar el contenido promedio de C, N, P, Mg, Ca, K, Fe, Mn y Zn, en los primeros 60 cm de profundidad del

Grupo*	Contenido de nutrientes (Kg.ha ⁻¹)								
	C (x 10 ³)	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Fe
Ron	125 (17) ab	9463 (32) a	14 (55) ab	623 (40) a	884 (46) a	6346 (45) a	655 (76) a	17 (141) a	138 (31) b
Pe	96 (45) a	8383 (57) a	28 (71) b	1061 (89) a	1966 (73) b	9071 (55) ab	979 (62) a	20 (66) a	81 (41) a
Ros	196 (9) b	11213 (16) a	12 (65) a	804 (41) a	1443 (52) ab	10772 (16) b	910 (35) a	9 (16) a	139 (24) b

* Ron: suelo rojo zona norte; Ros: suelo rojo zona sur; Pe: suelo pedregoso. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) del valor medio entre grupos. Entre paréntesis coeficientes de variación.

Tabla 3. Contenido de nutrientes en el suelo (Kg.ha⁻¹) hasta 60 cm de profundidad en cada uno de los grupos de sitios estudiados.

Table 3. Soil nutrient content (Kg.ha⁻¹) up to 60 cm depth at each studied site group

suelo para cada uno de los 3 agrupamientos en la fracción fina del suelo.

El menor contenido de C (carbono orgánico) en suelos pedregosos es coincidente con lo encontrado por Bornemann *et al.* (2011), quienes muestran que a mayor porcentaje de pedregosidad en el suelo disminuye su contenido de C. La materia orgánica, de la cual deriva el C, es considerada indicador de sostenibilidad (Cruz-Flores & Etchevers-Barra, 2009), siendo recomendable su conservación en suelos tropicales, ya que influye en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Moraes Sá & Lal, 2009; Rivero *et al.*, 2004). Además, actúa como reservorio de nutrientes (Pulido-Moncada *et al.*, 2010) y contribuye con la reducción del contenido de carbono atmosférico (Lal, 2003). Si bien la MO actúa como reservorio de nutrientes, lo cual a priori indicaría que mayor contenido de C directamente relacionado con mayor contenido de MO, debería ser coincidente con mayor contenido de nutrientes. Esta relación la manifestó solo el N, ya que elementos como P, considerado elemento crítico para el crecimiento en la región (Goya *et al.*, 2003; Martiarena *et al.*, 2011a, b), mostró mayor contenido de P en suelos pedregoso, coincidente con el menor contenido de C (Tabla 3). Esta asociación tiene que ver principalmente con el tipo de suelo, lo cual deja de manifiesto que el mayor contenido de nutrientes, excepto N, está influenciado por la permanente meteorización de fragmentos gruesos en el perfil (Rau *et al.*, 2011), mientras que el contenido de N es dependiente de la mineralización de la materia orgánica.

La relación C:N, considerada como un parámetro de calidad o riqueza del suelo, puede observarse en los sitios con suelos pedregosos que fue de 12.6, 10.9 y 14.8 respectivamente en los espesores 0-10, 10-30 y 30-60 cm, siendo estos valores inferiores a los sitios con suelos rojos, que fueron, en promedio de las dos zonas de suelos rojos, de 13.9, 13.7 y 15.3. Esta tendencia podría indicar menor proporción de mineralización de la materia orgánica respecto de los suelos

pedregosos, no obstante, estos valores son bajos de acuerdo a los límites de nula mineralización establecidos por Duchaufour (1984), cuyo rango corresponde a valores entre 25 y 30. En contraposición Almeida *et al.* (2012), en plantaciones de *Pinus* sp. en Brasil encontraron valores de relación C:N entre 34 y 19 en los primeros 15 cm de espesor, quienes atribuyen estos valores a la menor descomposición de la materia orgánica como consecuencia de la acidificación que produce en el suelo la descomposición de las hojas del pino, valores que difieren notoriamente de los encontrados en éste trabajo. En bosques nativos de Misiones, los valores de relación C:N en los espesores 0-10 y 10-30 cm de suelo son respectivamente de 10.2 y 9.0 (R. Martiarena, datos inéditos), lo cual sugiere una mayor mineralización de la materia orgánica en presencia de materiales orgánicos con mayor concentración de nutrientes, respecto de los sitios con plantaciones de *P. taeda* presentados en este trabajo.

La elevada concentración de P en los suelos pedregosos, también influyó sobre la relación C:P siendo inferior respecto de los suelos rojos. De la misma manera, la relación N:P fue menor en los suelos pedregosos.

Concentración foliar de carbono, nitrógeno y fósforo

En la Tabla 4 se puede observar las concentraciones de C, N y P, y sus cocientes, en las hojas de *P. taeda*, de cada uno de los tres grupos de las plantaciones.

La concentración de N y P es significativamente mayor en hojas de plantas del agrupamiento del sur (Ros), respecto de los agrupamientos de la zona norte (Ron y Pe), sin diferir estadísticamente entre éstos últimos. Independientemente de la comparación entre agrupamientos edafoclimáticos, los valores promedio obtenidos de concentración foliar de P en este trabajo para los diferentes agrupamientos, fueron inferiores a los valores considerados

Grupo*	Contenido de nutrientes (Kg.ha ⁻¹)								
	C (x 10 ³)	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Fe
Ron	125 (17) ab	9463 (32) a	14 (55) ab	623 (40) a	884 (46) a	6346 (45) a	655 (76) a	17 (141) a	138 (31) b
Pe	96 (45) a	8383 (57) a	28 (71) b	1061 (89) a	1966 (73) b	9071 (55) ab	979 (62) a	20 (66) a	81 (41) a
Ros	196 (9) b	11213 (16) a	12 (65) a	804 (41) a	1443 (52) ab	10772 (16) b	910 (35) a	9 (16) a	139 (24) b

* Ron: suelo rojo zona norte; Ros: suelo rojo zona sur; Pe: suelo pedregoso. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) del valor medio entre grupos. Entre paréntesis: coeficientes de variación.

Tabla 4. Concentración de nutrientes en las hojas de *P. taeda* en cada uno de los grupos de sitios estudiados.

Table 4. Nutrient concentration in *P. taeda* leaves for each studied site group

críticos para la especie (Sybert, 2006), lo que muestra la adaptabilidad de la especie a las diferentes condiciones de sitio.

Los valores C:N son bastante altos como suele encontrarse en las coníferas siempreverdes, lo que sugiere cierta frugalidad compatible con plantas que suelen vivir en suelos pobres en nutrientes, donde asimismo suele haber una limitación en la duración de la estación de crecimiento –que no es el caso de la zona bajo estudio–; tal vez la extensión anual de la estación de crecimiento del Subtrópico compense en parte, la tendencia a una menor tasa fotosintética de las hojas perennes con menos N.

En términos generales el cociente foliar N:P = 14 a 15, sugiere que si hay un nutriente que puede ser relativamente escaso en la zona de plantación, ese es el P.

Los valores C:N son bastante altos como suele encontrarse en las coníferas siempreverdes, lo que sugiere cierta frugalidad compatible con plantas que suelen vivir en suelos pobres en nutrientes, donde asimismo suele haber una limitación en la duración de la estación de crecimiento –que no es el caso de la zona bajo estudio–; tal vez la extensión anual de la estación de crecimiento del Subtrópico compense en parte, la tendencia

a una menor tasa fotosintética de las hojas perennes con menos N.

En términos generales el cociente foliar N:P = 14 a 15, sugiere que si hay un nutriente que puede ser relativamente escaso en la zona de plantación, ese es el P.

Índice de sitio de las plantaciones y su relación con los nutrientes

El IS (índice de sitio) promedio de los agrupamientos mostró que los rodales de *P. taeda* establecidos en suelos rojos se diferenciaron de los sitios con *P. taeda* en suelos pedregosos. En el norte de la región de estudio y en suelos rojos, las plantaciones de *P. taeda* tuvieron IS = 23.5 m, mientras que sobre el mismo tipo de suelo en la región sur el IS = 23.8 m. Las plantaciones de la región norte sobre suelos pedregosos fueron las de menor crecimiento con un IS = 20.9 m. Bellote *et al.* (2005) encontraron que el crecimiento en suelos pedregosos del Estado de Paraná en Brasil, fue menor respecto de los suelos rojos en dicha región, similar a lo que resulta de este estudio.

La Tabla 3 muestra que los contenidos de P y K, considerados estos elementos como lo

de mayor criticidad para la región de estudio (Goya *et al.*, 2003, Martiarena *et al.*, 2011), son mayores en los suelos pedregosos, sitios éstos que mostraron el menor IS. Esto muestra que para esta región y bajo las condiciones de estudio, el IS no se relaciona, al menos solamente, con el contenido de nutrientes críticos del suelo. El menor crecimiento en los sitios con suelos pedregosos permite inferir que bajo las condiciones de estudio *P. taeda* no es dependiente de la condición nutricional del suelo, o al menos, con los niveles de nutrientes actuales de estos suelos. Como se mencionó, la profundidad efectiva y el

volumen de la fracción fina de suelo varió entre los diferentes tipos de suelo, lo cual puede estar marcando la diferencia en el crecimiento. La profundidad de suelo ha sido utilizada para determinar en algunos casos la calidad del sitio (Kimsey *et al.*, 2011), y ésta junto con la fracción fina se vinculan con el volumen físicamente apto para ser ocupado y explorado por las raíces para obtener agua, nutrientes y anclaje (Gardner *et al.*, 1999). Fisher & Binkley (2000), aluden que suelos pedregosos con menos de 25 cm de profundidad efectiva tiene efectos directos sobre el crecimiento de la plantación. Estos

Espesor de suelo (cm)	Coeficiente de correlación concentración de nutrientes - IS								
	C	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Fe
0-10	-0.48 (0.01)	-0.53 (0.002)	-0.60 (0.0004)	-0.12 (0.51)	-0.35 (0.05)	-0.34 (0.07)	-0.38 (0.05)	-0.43 (0.03)	-0.09 (0.66)
10-30	-0.40 (0.03)	-0.47 (0.01)	-0.35 (0.05)	-0.01 (0.96)	-0.26 (0.17)	-0.23 (0.22)	-0.38 (0.05)	-0.31 (0.12)	-0.20 (0.32)
30-60	-0.50 (0.01)	-0.35 (0.07)	-0.39 (0.05)	-0.18 (0.36)	-0.32 (0.10)	-0.09 (0.66)	-0.50 (0.01)	-0.31 (0.14)	-0.28 (0.19)

Espesor de suelo (cm)	Coeficiente de correlación contenido de nutrientes - IS								
	C	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Fe
0-10	0.07 (0.72)	-0.16 (0.40)	-0.53 (0.0023)	0.09 (0.63)	0.02 (0.93)	-0.14 (0.45)	-0.08 (0.71)	-0.24 (0.23)	-0.03 (0.87)
10-30	0.18 (0.32)	-0.09 (0.62)	-0.34 (0.07)	0.20 (0.27)	-0.18 (0.32)	-0.10 (0.60)	-0.05 (0.79)	-0.12 (0.54)	-0.17 (0.41)
30-60	0.08 (0.71)	0.10 (0.63)	-0.40 (0.04)	0.05 (0.82)	-0.05 (0.82)	-0.02 (0.94)	-0.31 (0.15)	-0.16 (0.47)	-0.24 (0.26)

Referencias: valor del coeficiente de correlación (r) de -1 a 1. Valores positivos indican que ante mayores IS mayor concentración / contenido de nutrientes en el suelo, según corresponda. Valores negativos indican que ante mayores IS menor concentración / contenido de nutrientes en el suelo, según corresponda.

Tabla 5. Coeficientes de correlación (r), y valor de probabilidad de la correlación (entre paréntesis) entre el índice de sitio (IS) y la concentración y contenido de nutrientes en el suelo.

Table 5. Correlation coefficients (r) and probability (between brackets) among site index (IS) and the soil nutrient concentration and content

autores también mencionan que los suelos pedregosos retienen menor cantidad de agua, ya que la expansión y contracción de las piedras forman mayor cantidad de macroporos y canales entre ellas; el menor crecimiento en el caso de *P. taeda* sobre suelos pedregosos podría incluir como causa derivada de las características físicas a la menor capacidad de retención de agua, ya que las precipitaciones del norte misionero son elevadas. Bellote *et al.* (2005) corroboraron en Brasil, las diferencias de capacidad de retención de agua en suelos rojos respecto de pedregosos; allí, entre los 10 y 30 cm de espesor de suelo, el agua disponible en suelos rojos duplicó aquella de suelos pedregosos.

La correlación IS y concentración de nutrientes en el suelo, analizada con la totalidad de los datos de los tres sitios, es negativa para los tres espesores de suelo, en la totalidad de los elementos nutritivos estudiados (Tabla 5). La correlación con las mismas variables, individualizando los sitios (Ron, Pe y Ros), destacó la concentración de P con correlación negativa en los tres sitios y en todos los espesores de suelo, lo que indica que menor concentración de P en el suelo mayor IS.

Los coeficientes de correlación obtenidos para el IS y el contenido de cada uno de los nutrientes estudiados hasta los 60 cm de espesor de suelo, en la totalidad de los sitios, muestra que el contenido de P en el perfil es el único elemento que se asoció significativamente con el IS (Tabla 5). Esta asociación es negativa, lo cual indicaría que, bajo las condiciones de estudio el P no sería limitante para el crecimiento de *P. taeda*.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos destacan que el crecimiento de las plantaciones de *P. taeda* tienen mayores limitaciones (menor IS) en suelos pedregosos respecto de los suelos rojos, independientemente del agrupamiento edafoclimático. Los suelos pedregosos

resultaron ser los mejores provistos en nutrientes por unidad de superficie, lo cual se debería a la diferencia en el tiempo de desarrollo y meteorización (mayor en los suelos rojos profundos). Sin embargo, los suelos pedregosos poseen una menor profundidad efectiva y menor volumen de la fracción fina, lo que podría manifestarse más intensamente en los intervalos sin lluvias generando escasez de agua en comparación con los suelos rojos, afectando negativamente el crecimiento. Adicionalmente, la mayor oferta de nutrientes en los sitios con suelo pedregoso no se observó aumento en la concentración de N y P foliares, comparado con los sitios de suelos rojo profundo, lo cual muestra que los nutrientes no resultan una limitante al crecimiento en las condiciones actuales de los suelos cultivados con la especie en cuestión.

En los suelos rojos profundos, cuya concentración y contenido de nutrientes es similar, el crecimiento es mayor en la zona sur que en la zona norte. Ambas zonas tienen temperaturas similares, no obstante la zona sur posee cerca de 500 mm menos de precipitaciones, lo que hace suponer un mayor déficit de saturación atmosférica y una mayor demanda de agua. La mayor transpiración, en un contexto subtropical húmedo semejante daría lugar a un mayor crecimiento tal como lo expresa el mayor índice de sitio.

La disponibilidad de fósforo en los suelos sigue los patrones expresados en la literatura, que considera que éste es el principal nutriente limitante en suelos tropicales antiguos, pero que en general, los suelos jóvenes o incipientes muestran mayor concentración de P, como se observó con los suelos pedregosos.

En cuanto a la nutrición y crecimiento de las plantaciones de *P. taeda* en la República Argentina, se recomienda que los futuros estudios abordados para correlacionar variables edáficas con crecimiento de las plantaciones, consideren el estudio de las variables físicas del suelo, cuya incidencia de estas últimas creemos fueron las responsables de los resultados encontrados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es producto del trabajo de Tesis Doctoral de Rodolfo Martiarena, en ejecución, a presentar en la Universidad Nacional de La Plata. Se realizó en el marco del Convenio de Colaboración de largo plazo establecido entre la Universidad Nacional de La Plata y el Instituto Internacional de Dasonomía Tropical (IITF), Puerto Rico, perteneciente al USDA Forest Service. Agradecemos a Mary Jeanne Sánchez, Maribelis Santiago, Edwin López y demás integrantes del Laboratorio Químico del IITF por su tarea de análisis de las muestras de material vegetal. Agradecemos también a las empresas LIPSIA SA, Laharrague Chodorge SA, Forestal Bosques del Plata SA, Papel Misionero SA, Taeda SA y a los señores Eduardo DeCoulom, Eugenio Kimmich y Ernesto Reig por facilitar el ingreso a lotes de su propiedad para realizar los muestreos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agnelli A, Ugolini F & Corti G & Pietramellara G. 2001. Microbial biomass-C and basal respiration of fine earth and highly altered rock fragments of two forest soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 33: 613-620
- Almeida H, Pinheiro Dick D, Bertotto F & Chitarra G. 2012. Distribution of chemical compartments of soil organic matter and c stocks of a Cambisol from south Brazil as affected by Pinus afforestation. *Quimica Nova*, 35 (7): 1329-1335
- Bellote A, Filho A & Dedeczek R. 2005. Influência dos nutrientes minerais e do solo sobre a produtividade, a estrutura anatômica e a densidade da madeira de Pinus taeda. Colombo. *Embrapa Florestas*: 94 p (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 161517-536X; 121)
- Bornemann L, Herbst M, Welp G, Vereecken H & Amelung W. 2011. Rock fragments control size and saturation of organic carbon pools in agricultural topsoil. *Soil Science Society of America Journal*, 75: 1898-1907
- Casals P, Romanyà J, Cortina J, Bottner P, Coûteaux M & Vallejo V. 2000. CO₂ efflux from a Mediterranean semi-arid forest soil. I. Seasonality and effects of stoniness. *Biogeochemistry*, 48: 261-281
- Cerdá A. 2001. Effects of rock fragment cover on soil infiltration inter rill runoff and erosion. *European Journal of Soil Science*, 52: 59-68
- Certini G, Campbell C & Edwards C. 2004. Rock fragments in soil support a different microbial community from the fine earth. *Soil Biology & Biochemistry*, 36: 1119-1128
- Cocos O. 1997. Soil-forming factors and their impact on the evolution of soils in the upper semenic mountains. *Geographica Pannonica*, 1: 11-12
- Cousin I, Nicoullaud B & Coutadeur C. 2003. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. *Catena* 53: 97-114
- Crechi E, Fassola H & Maestropaolo J. 1999. Manual de Descripción Técnica del Simulador Forestal de Pinus taeda 2.0. INTA EEA Montecarlo – Facultad de Ciencias Forestales - Empresas forestales de Misiones y NE de Corrientes: 16 p
- Cruz-Flores G & Etchevers-Barra J. 2009. Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *Agrociencia*, 45: 849-862
- Cuniglio R, Corti G & Agnelli A. 2009. Rock fragment evolution and nutrients release in vineyard soil developed on a thinly layered limestone (Tuscany, Italy). *Geoderma*, 148: 375-383
- Danalatos N, Kosmas C, Moustakas N & Yassoglou N. 1995. Rock fragments II. Their impact on soil physical properties and biomass production under Mediterranean conditions. *Soil Use and Management*, 11: 121-126

- Duchaufour P. 1984. *Edafología. 1: Edafogénesis y clasificación*. Edit Masson. Barcelona: 493 p
- ECOS - GEF-PNUD. 2002. Manejo y conservación de la biodiversidad en los humedales de los Esteros del Iberá. Proyecto ARG/02/G35, Provincia de Corrientes, Argentina: 172 p
- Eriksson C & Holmgren P. 1996. Estimating stone and boulder content in forest soils – evaluating the potential of surface penetration methods. *Catena*, 28: 121-134
- Etchevehere P. 1976. *Normas de reconocimiento de suelos*. 2º Edición actualizada. Secretaría de Agricultura y Ganadería. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Departamento suelos. SUELOS - Publicación Nº 152: 210 p
- Fernández R, Lupi A, Pahr N, Reis H, O'Lery H & Gelid M. 2000. Técnicas de manejo de residuos de cosecha para el establecimiento forestal y su impacto sobre la condición química de los suelos rojos del noreste de Argentina. P 243-248 En: *Avances en Ingeniería Agrícola*. Ed Facultad Agronomía (UBA), Buenos Aires: 686 p
- Fisher R & Binkley D. 2000. *Ecology and management of forest soils*. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc.: 489 p
- Forsythe W. 1975. *Física de suelos*. Manual de laboratorio. IICA, Turrialba: 221 p
- Frangi JL, Arturi M, Goya JF, Vaccaro S & Píccoli G. 2004. La sucesión secundaria del bosque subtropical y su importancia ecológica y agrícola en el centro y sur de Misiones. Cap 3: 11 p. En: Arturi MF, Frangi JL & Goya JF (eds) *Ecología y Manejo de los Bosques de Argentina*. EDULP (Editorial Universidad Nacional de La Plata). ISBN 950-34-0307-3. Disponible en: http://www.sedici.unlp.edu.ar/search/request.php?id_document=ARG-UNLP-EBook-0000000006
- Gardner C, Laryea K & Unger P. 1999. Soil physical constraints to plant growth and crop production. AGL/MISC/24/99. FAO, Roma: 96 p
- Goya J, Perez C, Frangi J & Fernández R. 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda*. *Ecología Austral*, 13(2): 139-150
- Harms WR, Whitesell CD & DeBell DS. 2000. Growth and development of loblolly pine in a spacing trial planted in Hawaii. *Forest Ecology and Management*, 126: 13-24
- Heisner U, Raber B & Hildebrand E. 2004. The importance of the soil skeleton for plant-available nutrients in sites of the Southern Black Forest, Germany. *European Journal Forest Research*, 123: 249-257
- Holdridge LR. 1967. *Life Zone Ecology*. Tropical Science Center, Costa Rica: 216 p
- Hope GD. 2007. Changes in soil properties, tree growth, and nutrition over a period of 10 years after stump removal and scarification on moderately coarse soils in interior British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 242: 625-635

- Infostat. 2008. Software estadístico. Versión 2.0. Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba.
- Jackson M. 1964. *Análisis químico de suelos*. Ediciones Omega SA: 662 p
- Johnson C, & Ulrich A. 1959. Analytical methods for use in plant analysis. *Bulletin of the University of California Agricultural Experiment Station*, 766: 26–27
- Jokela E. 2004. Slash pine: still growing and growing. En: Dickens E, Barnett J, Hubbard W & Jokela E (Eds) *Proceedings of the slash pine symposium*. Gen. Tech. Rep. SRS-76. Asheville, NC: US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station: 148 p
- Kimsey M, Garrison-Johnston M & Johnson L. 2011 Characterization of Volcanic Ash-Influenced Forest Soils across a Geoclimatic Sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 75: 267–279
- Lal R. 2005. Forest soil and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220: 242–258
- Ligier D, Matteio H, Polo H & Rosso J. 1990. *Atlas de suelos de la República Argentina*. Misiones. Secretaría de Agricultura, Ganadería Pesca. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro de investigaciones de Recursos Naturales, Buenos Aires. Tomo II: 41 p
- Martiarena R, Frangi J, Pinazo M, Von Wallis A & Fernández R. 2011a. Effect of thinning and harvest type on storage and losses of Phosphorous in *Pinus taeda* L plantations in Subtropical Argentina. *International Journal of Forestry Research*, ID 761532: 10 p DOI:10.1155/2011/761532
- Martiarena R, Pinazo M, Von Wallis A, Knebel O & Pahr N. 2011b. Alternativas de manejo para la conservación de nutrientes en sistemas forestales en Misiones, Argentina. *Revista Ciencia del Suelo*, 29 (1): 39–48
- Martiarena R, Von Wallis A & Knebel O. 2009. Pérdida de nutrientes durante la cosecha y el establecimiento forestal, en un rodal de *Pinus taeda* en Wanda, Iguazú, provincia de Misiones, Argentina. *Revista Forestal Venezolana*, 53 (2): 165–173
- Martín-García M, Delgado G, Párraga J, Gámiz E & Delgado R. 1999. Chemical, mineralogical and micromorphological study of coarse fragments in Mediterranean red soils. *Geoderma*, 90: 23–47
- Moráes Sá J & Lal R. 2009. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. *Soil & Tillage Research*, 103: 46–56
- Novák V & Knava K. 2012. The influence of stoniness and canopy properties on soil water content distribution: simulation of water movement in forest stony soil. *European Journal Forest Research*, 131:1727–1735
- Píccolo GA, Goya JF, Frangi JL, Arturi MF & S Vaccaro. 2002. *Materia Orgánica y Nutrientes en Suelos de Ecosistemas Subtropicales de Cultivo Anual, Foresto-Ganadero y Bosque Secundario*. INTA,

Publicaciones regionales, Cerro Azul, Misiones (Argentina), Informe Técnico N° 76: 12 p

- Pinazo M, Martiarena R, Von Wallis A, Crechi E, Pahr N & Knebel O. 2007. Efectos de la intensidad de raleo sobre la compartimentalización y stock de carbono en plantaciones de *Pinus taeda* L. establecida sobre Ultisoles de Misiones. RIA (Revista de Investigaciones Agropecuarias, Argentina), 36: 5-20
- Porta J, López-Acevedo M & Roquero C. 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3° edición revisada y ampliada*. Ediciones Mundi-Prensa: 929 p
- Pulido-Moncada M, Flores B, Rondón T, Hernández R & Lozano Z. 2010. Cambios en fracciones dinámicas de la materia orgánica de dos suelos, Inceptisol y Ultisol, por el uso de cultivo de cítricas. *Bioagro*, Venezuela, 22(3): 201-210
- Rau B, Melvin A, Johnson D, Goodale C, Blank R, Frederiksen G, Miller W, Murphy J, Todd D & Walker R. 2011. Revisiting Soil Carbon and Nitrogen Sampling: Quantitative Pits versus Rotary Cores. *Soil Science*, 176: 273-279
- Rivero C, Chirenje T, Ma L & Martinez G. 2004. Influence of compost on soil organic matter quality under tropical conditions. *Geoderma*, 123: 355-361
- Rytter R. 2012. Stone and gravel contents of arable soils influence estimates of C and N stock. *Catena*, 95: 153-159
- Shi Z, Xu L, Wang Y, Yang X, Jia Z, Guo H, Xiong W & Yu P. 2012. Effect of rock fragments on macropores and water effluent in a forest soil in the stony mountains of the Loess Plateau, China. *African Journal of Biotechnology*, 11(39): 9350-9361
- Shi Z, Yanhui W, Yu P, Xu L, Hao G & Guo H. 2008. Effect of rock fragments on the percolation and evaporation of forest soil in Liupan Mountains, China. *Acta Oecologica Sinica*, 28(12), 6090-6098
- Soil Survey Staff. 2010. *Keys to Soil Taxonomy*. Agriculture Handbooks 436, Eleventh Edition. NRCS, Washington DC, USA
- Stendahl J, Lundin L & Nilsson T. 2009. The stone and boulder content of Swedish forest soils. *Catena*, 77: 285-291
- Sybert R. 2006. *Diagnosis of loblolly pine (Pinus taeda L.) nutrient deficiencies by foliar methods*. Thesis submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Forestry: 123 p
- Tabatabai M, & Bremner J. 1991. *Automated instruments for determination of total carbon, nitrogen and sulfur in soils by combustion techniques*. Soil analysis modern instrumental techniques. 2nd ed. Dekker. Nueva York, EEUU : 261-286
- Tetegan M, Baize N, Bouthier D & Cousin A. 2011. The contribution of rock fragments to the available water content of stony soils: proposition of new pedotransfer functions. *Geoderma*, 165, 40-49

- USDA (United States Department of Agriculture). 1999. *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América: 88 p
- Vaccaro S, Arturi MF, Goya JF, Frangi JL & Píccolo G.. 2003. Almacenaje de carbono en estadios de la sucesión secundaria en la provincia de Misiones. *Interciencia*, Venezuela, 28 (9): 521-527
- Van Wesemael B, Mulligan M & Poesen J. 2000. Spatial patterns of soil water balance on intensively cultivated hillslopes in a semi-arid environment the impact of rock fragments and soil thickness. *Hydrological processes*, 14: 1128-1133
- Vitousek PM. 2004. *Nutrient cycling and limitation. Hawaii as a Model System*. Princeton University Press, USA
- Vitousek PM & Farrington H. 1997. Nutrient limitation and soil development: experimental test of a biogeochemical theory. *Biogeochemistry* 37: 63-75
- Walker TW & Syers JK 1976. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 15: 1-19
- Whitney N & Zabowski D. 2004. Total Soil Nitrogen in the Coarse Fraction and at Depth. *Soil Science Society America Journal*. 68: 612-619