

EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LIGNINA COMO INDICADOR DE LA CAPACIDAD DE APORTE DE NITRÓGENO DE RESIDUOS ORGÁNICOS

T. M. Hernández-Mendoza¹; E. Salcedo-Pérez²;
G. Arévalo-Galarza¹; A. Galvis-Spinola²

¹Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carretera México-Texcoco.
Chapingo, Estado de México. C. P. 56230.

²Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carretera México-Texcoco.
Montecillo, Estado de México. C. P. 56230.

RESUMEN

Los materiales orgánicos pueden constituir una alternativa eficaz al uso de fertilizantes sintéticos, siempre y cuando se tomen en cuenta de manera apropiada las diversas variables bióticas y abióticas que influyen sobre su descomposición en el suelo. Una forma de proceder es a través del empleo de diferentes indicadores que infieran su tasa de mineralización y capacidad de aporte nitrogenado (C_{AN}). Entre estos, destaca el uso de la relación carbono:nitrógeno (C/N) como índice de la susceptibilidad de los residuos orgánicos al ataque de la biomasa microbiana; sin embargo, su empleo ha generado resultados contradictorios, por lo que en el presente estudio se comparó la mineralización de residuos con diferente composición bioquímica para precisar un mejor indicador de la C_{AN} . Para ello, se evaluó por incubación *in vitro* los residuos aplicados en suelo Regosol eútrico, a 30 °C y capacidad de campo constantes durante 20 semanas. La tendencia de la mineralización e inmovilización de N dependieron de la composición bioquímica del material, donde su relación C/N se asoció significativamente con la mineralización del N lábil del suelo, pero no así con la descomposición neta de los residuos. En contraste, la concentración de la lignina en el residuo tuvo una tendencia lineal con el N lábil potencialmente mineralizable y su tasa de mineralización, estimando de manera significativa la C_{AN} .

PALABRAS CLAVE: lignina, relación C/N, N potencialmente mineralizable.

EVALUATION OF THE INDICATING CONCENTRATION OF LIGNIN AS OF THE CAPACITY OF NITROGEN CONTRIBUTION OF ORGANIC REMAINDERS

SUMMARY

The organic materials decomposition in the soil depends on biological and non-biological variables, these are an effective alternative of usage instead synthetic fertilizers; the way to proceed is to use different indicators which infer their mineralization rate and ability to supply nitrogen (C_{AN}). Among these the relation Carbon:Nitrogen is standing as indicator of susceptibility from organic residues; nevertheless its application has generated contradictory results, thus this paper showed the comparison of residues mineralization with different biochemical composition to precise the best indicator of C_{AN} . The procedure was to evaluate by *in vitro* incubation the residues applied into Regosol eutric soil, to 30 °C and yield capacity constant during long time. The trend of mineralization of N depend of the biochemical composition of material, where its C/N relationship was associated significantly with mineralization of labile N from soil, although it was not adequately related to the net-decomposition of the residues. In contrast the lignin concentration of the residues had a linear tendency with labile N potentially mineralizable, and its rate of mineralization pointing out significantly the C_{AN} .

KEY WORDS: lignin, C/N rate, potentially mineralizable nitrogen.

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) que requieren las plantaciones forestales depende en gran medida de la descomposición

de los materiales orgánicos que se reciclan, especialmente de la hojarasca (Razgulin, 2004). La concentración de N en el mantillo varía según el tipo de bosque, donde la tasa neta

de nitrificación puede ser 120 veces mayor en los sitios con alto contenido de N y poco contenido de lignina en la hojarasca, respecto a los que tienen bajo contenido de N y alto contenido de lignina en la hojarasca (Rice *et al.*, 2004). El N edáfico que potencialmente se mineraliza varía según el manejo al que es sometido el suelo, lo cual está relacionado con el tipo y cantidad de material orgánico ya sea aplicado a través del manejo o depositado de manera natural (Carlen *et al.*, 2004). Por lo tanto, con el desmonte se interrumpe el equilibrio entre las entradas de N orgánico y salidas de N inorgánico del terreno agotando las reservas orgánicas edáficas, mientras que el uso de materiales fertilizantes incrementa el potencial de mineralización de N (Jussy *et al.*, 2004), debido a que los cambios en la calidad de la materia orgánica reducen la efectividad de las enzimas extracelulares y tasa de mineralización (Fox, 2004).

De acuerdo a Jeffs *et al.* (2004), es factible evaluar los patrones de la dinámica del N a través de procedimientos *in vitro*, indistintamente del tipo de bosque y cuenca de interés, para lo cual es suficiente emplear 28 días de incubación. Sin embargo, diversos autores como Cabrera *et al.* (2005) y Probert *et al.* (2005) señalan que aún es necesario precisar los procedimientos vigentes para cuantificar adecuadamente los aportes de N inorgánico netos, puesto que no siempre funciona la relación carbono-nitrógeno (C/N) como indicador de la mineralización de los materiales orgánicos.

La relación C/N es un componente más de un conjunto de variables que influyen de manera significativa sobre la mineralización de los residuos orgánicos que se aplican al suelo (Probert *et al.*, 2005). De hecho, en la literatura internacional persiste la controversia sobre la utilidad de la información que provee la relación C/N para evaluar la tasa de mineralización de los insumos orgánicos. Por ejemplo, Diallo *et al.* (2005) no encontraron relación alguna entre el contenido de N, celulosa, hemicelulosa y lignina, con la mineralización del N, lo cual puede ser explicado considerando que la adición de materiales con una alta relación C/N estimula a través del tiempo una mineralización neta del N, pero el proceso de nitrificación lleva más tiempo. Además, es factible que la adición de materiales muy lábiles (como sacarosa) induzcan incluso una inmovilización neta en suelos que tienen una alta tasa de mineralización y nitrificación, por lo que la calidad del sustrato por sí misma no necesariamente es un buen indicador de los procesos que regulan la dinámica del N en el suelo (Gilliam *et al.*, 2005). A esta misma conclusión llegaron Uratani *et al.* (2004) quienes emplearon la relación C/N, contenido de lignina y la relación lignina/N como indicadores de la descomposición de las plantas usadas comúnmente como abonos verdes.

En contraste a los estudios anteriores, Pypers *et al.* (2005) detectaron que al cabo de dos semanas de incubación, la tasa de mineralización de N de residuos de leguminosas varió de manera inversa a la concentración de

lignina y relación lignina-N. A su vez, Paul y Solaiman (2004) al incubar el suelo durante 84 días con diversos materiales orgánicos, los residuos que fomentaron la inmovilización tuvieron una estrecha asociación ($r=0.997^{**}$) entre el incremento del C y N en la biomasa microbiana con la relación (C/N) del residuo. En concordancia con este estudio, Lin YuWen *et al.* (2003) reportan que el N mineralizado acumulado en las primeras ocho semanas se correlacionó de manera significativa y negativa con la relación C/N de los materiales evaluados, mientras que Chaves *et al.* (2004) reportan una correlación negativa y significativa ($r=-0.86$) entre la cantidad de N que se mineraliza de diferentes tipos de residuos y su relación C/N, aunque la tasa de mineralización correlacionó mejor con la relación lignina-N ($r=-0.94$), detectando como punto crítico una relación C/N de 36.6 entre la mineralización e inmovilización netas.

En términos generales se puede colegir que las controversias que giran en torno a la utilidad de la relación C/N como indicador de la mineralización del N de los residuos orgánicos aplicados al suelo, son debidas a la consideración directa o indirecta del impacto de los demás factores sobre dicho proceso, ya que la relación C/N por sí misma no es suficiente para explicar toda la variabilidad observada en la mineralización del N entre diferentes residuos.

El manejo de los residuos orgánicos tiene efectos decisivos sobre los procesos que regulan la disponibilidad de N que proviene de los insumos aplicados al suelo. Una mineralización tardía implica que el N residual no sea aprovechado de manera apropiada por las plantas, acumulándose en el suelo, incrementando el riesgo de su lixiviación y representa un riesgo potencial de contaminación de las aguas subterráneas (Neve, 2004), por lo que es indispensable determinar los factores más relevantes que influyen sobre la mineralización del N y precisar mejor el manejo de los materiales orgánicos (Er *et al.*, 2005). Con base en lo anterior, en este trabajo se postula que la tasa de mineralización varía inversamente a la concentración de lignina del residuo, independientemente de su relación C/N y N que potencialmente se mineraliza, y se espera que este conocimiento permita hacer un uso más eficiente de los materiales orgánicos como fertilizantes y prevenir aplicaciones excesivas que induzcan problemas de contaminación por enriquecimiento de nitratos en los mantos freáticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudiaron diez residuos orgánicos con el propósito de evaluar sus diferencias en la tasa de mineralización, considerando que por su concentración de N y relación C/N son susceptibles de ser atacados rápidamente por la biomasa microbiana y que por lo mismo cualquiera de ellos pudiese ser empleado como material fertilizante. Para ello, en una primera fase se tomaron en cuenta aspectos relacionados con su labilidad, incluyendo como referencia

los que son muy resistentes a la descomposición. Los residuos orgánicos estudiados fueron los siguientes: a) foliolos de alfalfa colectadas antes de floración; b) hojas y tallos de trébol cortados antes de la floración de la pradera; c) follaje de ballico (*Lolium perenne*) después de 40 días del rebrote de una pradera establecida; d) plantas de maíz a 45 días después de la siembra (etapa vegetativa); e) tallos de maíz durante el inicio de la floración (95 días posteriores a la siembra); f) composta madura de gallinaza que se comercializa como material fertilizante; g) paja de frijol (incluyendo hojas y tallos) al inicio de la formación de las vainas; h) paja de sorgo (incluyendo tallos y hojas) al inicio de llenado de grano; i) paja de trigo en senescencia (incluyendo tallos y hojas); j) paja de arroz en senescencia (incluyendo tallos y hojas).

Los residuos orgánicos se secaron a 60 °C hasta alcanzar un peso seco constante y después fueron molidos y tamizados para homogenizar la muestra que se analizó por triplicado en el laboratorio, donde se determinó su concentración de C (combustión seca), N total (digestión húmeda y destilación por arrastre de vapor) y contenido de lignina, la cual se determinó de acuerdo a la técnica propuesta por el USDA Forest Products Laboratory (Murphy *et al.*, 1998), determinándola por gravimetría previa digestión de la muestra con ácido sulfúrico al 72 % por una hora a 308 °C y su posterior hidrólisis con ácido sulfúrico al 4 % (Effland, 1977).

El aporte de N de cada residuo como consecuencia de su mineralización se evaluó incubando los materiales orgánicos manteniendo constante la temperatura (30 °C) y humedad (capacidad de campo) durante todo el período de estudio (20 semanas) procediendo de la siguiente manera: Se pesaron 5 g de material seco, molido y tamizado de cada residuo, se incorporó manualmente a 15 g de suelo haciendo un total de 20 g de muestra. El suelo que se empleó para el presente estudio es un Regosol eútrico colectado en el Distrito de Huamantla, Tlaxcala, el cual se seleccionó por su escaso contenido de materia orgánica total (0.8 g·kg⁻¹), lo que permitiría que se exprese de mejor manera el efecto de los tratamientos evaluados. El suelo se secó al aire y a la sombra, y se tamizó a malla de 2 mm. La mezcla de cada residuo con el suelo, se colocó por duplicado en embudo de percolación sobre 20 g de arena gruesa de cuarzo (2 a 4 mm de diámetro) y arriba de la muestra otra cantidad igual de arena gruesa de cuarzo para facilitar el drenaje y permitir la aireación. Además, se incluyó el suelo solo (sin aplicación de residuos) como testigo. Una vez preparados los embudos se llevaron a capacidad de campo y se colocaron en una incubadora calibrada previamente a 30 °C (+/- 1 °C). Al cabo de 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 15, 17 y 20 semanas de incubación, se aplicaron 100 ml de CaCl₂ 0.01M y mediante vacío se recuperó el extracto para su posterior análisis del contenido de nitrato y amonio lixiviados en cada tiempo, midiéndolos con electrodos selectivos para cada ión.

La tendencia del N mineralizado acumulado obtenido en cada extracción (nitrato más amonio) se ajustó siguiendo el método propuesto por Galvis y Hernández (2004), considerando las primeras cinco semanas como la descomposición de las fracciones lábiles y las subsiguientes quince semanas de incubación como la descomposición de las fracciones resistentes. Con base en esto se estimó la tasa de mineralización y N potencialmente mineralizable de ambas fracciones.

El análisis de la información se efectuó mediante regresiones simples de diverso tipo (lineales, cuadráticas, potenciales o exponenciales), las cuales se seleccionaron con base en el máximo coeficiente de determinación. Finalmente, los datos de N inorgánico de cada residuo orgánico estudiado fueron comparados mediante la prueba de Tukey a una ($P=0.05$) empleando para ello el programa correspondiente del paquete estadístico del SAS (SAS Institute, 2003).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los materiales orgánicos que se evaluaron en el presente estudio fueron seleccionados con base en su composición bioquímica (Cuadro 1), la cual en el caso de los cultivos es función tanto de sus propias características como de su etapa fenológica.

Aunque se aseguró contar con un amplio ámbito de exploración, se hizo énfasis en residuos que pudiesen mineralizarse por completo para ser usados como materiales orgánicos fertilizantes. Por ello, ocho de los diez residuos elegidos tuvieron una relación C/N inferior a 40, valor considerado como crítico para que no ocurra una inmovilización neta (Tisdale *et al.*, 1999; Chaves *et al.*, 2004), mientras que los dos restantes se incluyeron sólo como punto extremo de observación del proceso de mineralización.

La variación del contenido de lignina se asoció estrechamente ($R^2=0.89$) con la relación C/N con una tendencia logarítmica. Esto se debe a que a medida que el tejido tiende a la senescencia, se incrementa su concentración de lignina, compuesto que forma parte de las estructuras carbonadas de los materiales orgánicos de las plantas, pero cuando el tejido tiene una relación C/N ≥ 40 , la concentración de lignina ya no cambiará de manera notoria (Thornley y Johnson, 1990), lo que corresponde a la etapa fenológica en que se cosecharon los cultivos para ser evaluados en este estudio. En contraste, la lignina y el N de los residuos tuvieron una relación lineal ($R^2=0.91$), lo cual se atribuye a que el cultivo en etapa vegetativa tiene una alta concentración de N y poca lignificación, mientras que en etapas más avanzadas de desarrollo ocurre lo contrario. En el Cuadro 2 se presenta el N mineralizado acumulado durante la incubación del suelo con los distintos residuos analizados.

CUADRO 1. Lignina (L), carbono (C), nitrógeno (N) y sus respectivas relaciones, de los residuos estudiados.

Tratamientos		L	C	N	C/N	L/N
Núm.	Material Orgánico	g·kg ⁻¹	g·kg ⁻¹	g·kg ⁻¹	g·g ⁻¹	g·g ⁻¹
1	Hojas de alfalfa (antes de floración)	50	440	48	9.2	1.0
2	Pradera de trébol (antes de floración)	80	460	38	12.1	2.1
3	Hojas de ballico (después del corte)	128	464	32	14.7	4.1
4	Hojas de maíz (etapa vegetativa)	84	452	28	16.1	3.0
5	Tallos de maíz (inicio de floración)	130	480	24	20.0	5.4
6	Composta madura de gallinaza	152	476	23	20.3	6.5
7	Paja de frijol (inicio formación vainas)	170	512	18	28.4	9.4
8	Paja de sorgo (inicio llenado grano)	186	488	15	32.1	12.2
9	Paja de trigo (senescencia)	198	512	9	56.9	22.0
10	Paja de arroz (senescencia)	220	500	7	71.4	31.4

CUADRO 2. Nitrógeno mineralizado acumulado (NO₃⁻ + NH₄⁺) del suelo con los distintos residuos analizados durante la incubación (30 °C y a capacidad de campo).

Semana	Suelo	Tratamientos									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		mgN·g ⁻¹									
1	15	40	37	38	39	37	35	33	25	7	6
2	42	83	78	68	71	73	63	62	58	28	16
3	62	112	120	112	120	100	81	78	77	38	25
4	75	150	146	130	135	128	103	91	85	58	32
5	90	198	175	158	165	142	125	115	106	83	42
7	105	242	220	180	186	163	149	135	121	107	71
9	113	283	242	200	221	190	158	163	143	118	91
11	121	315	270	220	230	215	193	175	161	127	116
15	130	351	305	240	256	230	210	187	170	143	141
17	132	363	312	258	263	235	215	190	175	152	144
20	135	371	322	261	268	239	217	191	178	156	147

1=alfalfa; 2=trébol; 3=ballico; 4=hojas de maíz; 5=tallos de maíz; 6=gallinaza; 7=paja de frijol; 8=paja de sorgo; 9=paja de trigo; 10=paja de arroz.

Los tratamientos con relación C/N ≤ 20 mostraron una mineralización neta de N. Las pajas de frijol y sorgo presentaron una tendencia irregular durante las primeras cinco semanas de incubación, lo que sugiere que ocurrió algún grado de inmovilización del N, apreciándose esto con mayor claridad en las pajas de trigo y arroz, puesto que el contenido de N en estos tratamientos fue inferior al del suelo, al menos durante las primeras cinco semanas de incubación para el caso del trigo, mientras que para el arroz perduró hasta la semana once. De hecho, las tendencias negativas del N mineralizado son congruentes con la aplicación de residuos con relación C/N > 40 y su efecto sobre la mineralización del N por la presencia de una inmovilización neta (Tisdale *et al.*, 1999). Al respecto, de acuerdo a Murphy *et al.* (1998), el efecto de la relación C/N del residuo aplicado sobre la mineralización o inmovilización del N depende en gran medida de la forma, método y cantidad de residuo

aplicado, N inorgánico en el suelo, así como de la temperatura y humedad en el medio, por lo que no necesariamente ocurrirá una inmovilización neta cuando se aplica un residuo con una alta relación C/N. En el caso del presente estudio, las condiciones se mantuvieron propicias para una óptima actividad de la biomasa microbiana y, como el manejo y cantidad de residuo fue igual por tratamiento, es viable considerar que la composición bioquímica del residuo sea la principal variable que condiciona la mineralización o inmovilización de los tratamientos evaluados, según lo establecen Uratani *et al.* (2004).

En el Cuadro 3 se presentan las ecuaciones de regresión de la relación entre la proporción del N neto mineralizado y el N total de cada residuo aplicado con la composición bioquímica de cada residuo. A pesar de que se mantuvieron las condiciones óptimas para la actividad

de la biomasa microbiana, sólo en tres tratamientos (alfalfa, trébol y maíz en etapa vegetativa) el N mineralizado fue ≥ 95 % al N orgánico aplicado. Esto hace ver lo difícil que es manejar residuos orgánicos como materiales fertilizantes, puesto que su composición bioquímica influye de manera decisiva sobre su descomposición, donde el contenido de lignina, N, C/N y lignina/N están estrechamente relacionadas con la proporción de N que aportan los residuos que se evaluaron en este estudio ($R^2 \geq 0.90$).

CUADRO 3. Ecuaciones de regresión de la relación entre $^{15}\text{N}_r/\text{N}_t$ y la concentración de lignina (L), carbono (C), nitrógeno (N), relación C/N o relación L/N.

Variables	Ecuación	R ²
$\text{N}_r/\text{N}_t = f(\text{Lignina})$	$\text{N}_r/\text{N}_t = -0.004(\text{L}) + 1.27$	0.94
$\text{N}_r/\text{N}_t = f(\text{Carbono})$	$\text{N}_r/\text{N}_t = -0.008(\text{C}) + 4.41$	0.75
$\text{N}_r/\text{N}_t = f(\text{Nitrógeno})$	$\text{N}_r/\text{N}_t = -0.0004(\text{N})^2 + 0.036(\text{N}) + 0.15$	0.91
$\text{N}_r/\text{N}_t = f(\text{C/N})$	$\text{N}_r/\text{N}_t = -0.491(\text{C/N}) + 3.24$	0.93
$\text{N}_r/\text{N}_t = f(\text{L/N})$	$\text{N}_r/\text{N}_t = -0.302(\text{L/N}) + 1.21$	0.90

¹Nr= nitrógeno neto mineralizado; Nt= nitrógeno total del residuo aplicado

Los tratamientos con más lignina y relación C/N (pajas de trigo y arroz) sólo contribuyeron con 47 y 34 % al N del suelo, lo cual era de esperarse por la resistencia que ofrece su composición bioquímica al ataque de la biomasa microbiana y que se evidenció con la inmovilización observada, lo cual es común encontrar al evaluar residuos con una alta relación C/N (Carlen *et al.*, 2004). Sin embargo, los tratamientos con relación C/N ≤ 20.3 no se mineralizaron completamente, sobre todo en el caso de las hojas de ballico, maíz en floración y composta madura de gallinaza, cuya mineralización fue 80, 87 y 70 %, respectivamente, al cabo de las 20 semanas de incubación. Esto explicaría por qué en condiciones de campo no siempre se obtiene el resultado que se espera con el uso de residuos orgánicos como materiales fertilizantes y permite ver que no basta sólo con saber su concentración de N para precisar la dosis a aplicar, ya que el N no se liberará tan pronto se aplique al suelo como si se tratase de fertilizantes sintéticos solubles, aun tratándose de materiales muy lábiles (relación C/N ≤ 20.3),

como ocurre con los abonos orgánicos provenientes de desechos de animales (Probert *et al.*, 2005) y que aún así se tienen problemas en la homogeneidad del aporte nitrogenado de dichos insumos.

Los tratamientos donde se aplicaron materiales menos susceptibles al ataque de la biomasa microbiana permanecieron por más tiempo en forma orgánica respecto a los que son más lábiles. Incluso pareciera que en esta información hay una aparente incongruencia porque el porcentaje de permanencia de los residuos de paja de trigo y arroz fue superior a 100 %. Esto se atribuye a que el N inorgánico del suelo fue asimilado por la biomasa microbiana y al incorporarlo en sus tejidos (inmovilización) ocasionó un déficit de N detectado en el análisis, incrementando el tiempo de respuesta a la mineralización y contenido de N orgánico, que es el caso frecuente en materiales de composición bioquímica similar como algunos tipos de mantillo (Murphy *et al.*, 1998).

Con el propósito de analizar la tendencia del porcentaje de permanencia de los residuos evaluados durante la etapa de mayor actividad de la biomasa microbiana y que está asociada con la mineralización de las fracciones más lábiles de los materiales orgánicos, en el Cuadro 4 se presenta los parámetros de regresión entre la cantidad de residuo que queda sin descomponerse respecto al tiempo de incubación.

Mientras más negativo es el valor de la pendiente de la regresión (b_1), menor será la proporción del residuo que permanecerá en forma orgánica en un tiempo dado, lo que delimita aquellos materiales que presentaron una mineralización neta (tratamientos 1 al 6) de los que tuvieron algún grado de inmovilización (tratamientos 7 al 10). En la Figura 1 se relacionó la tasa de variación de la permanencia de los residuos que mostraron una mineralización neta y su concentración de lignina o relación lignina/N en las primeras cinco semanas de incubación.

Hubo una estrecha relación entre la variación de la tasa de descomposición del residuo y la concentración de lignina o relación lignina/N de los residuos ($R^2=0.94$ y 0.93 , respectivamente). Desde el punto de vista estadístico, los tres tratamientos más lábiles (alfalfa, trébol y maíz en etapa

CUADRO 4. Parámetros de regresión lineal de la tendencia de la permanencia del residuo (P_{PR}) en las primeras cinco semanas (t) de incubación (fracciones lábiles).

Parámetros	¹ Tratamientos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$P_{PR} = b_0 + b_1(t)$									
b_0	100	97	94	93	88	88	82	88	99	112
b_1	-8.4	-8.5	-7.5	-9.5	-6.8	-3.2	-1.9	-2.0	17.8	27.1
R ²	0.95	0.99	0.95	0.93	0.94	0.74	0.99	0.87	0.98	0.94

¹1=alfalfa; 2=trébol; 3=ballico; 4=hojas de maíz; 5=tallos de maíz; 6=gallinaza; 7=paja de frijol; 8=paja de sorgo; 9=paja de trigo; 10=paja de arroz.

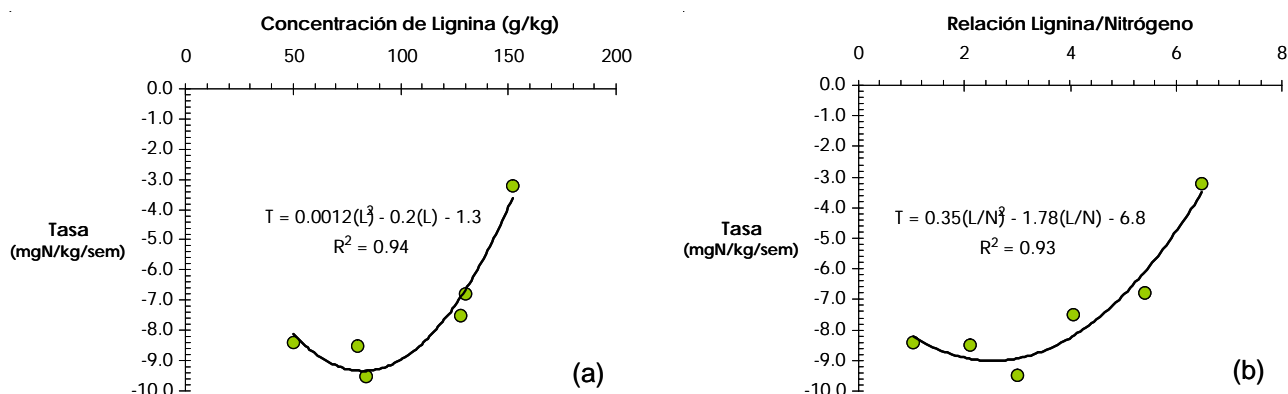


FIGURA 1. Tasa de permanencia en las primeras 5 semanas de incubación de los residuos con mineralización neta: a) concentración de lignina; b) relación lignina/N.

vegetativa) tuvieron la misma tasa de descomposición ($P < 0.01$) y su concentración de lignina fue estadísticamente diferente ($P < 0.01$), donde la lignina menor o igual a $84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ya no presenta cambios significativos en la tasa de mineralización. Aunque pudiesen ser escasos los datos considerados en este análisis para contar con una conclusión contundente, la comparación del tratamiento 3 (hojas de ballico) con el 4 (hojas de maíz en etapa vegetativa) arroja evidencias en apoyo a los resultados obtenidos. En teoría, el ballico debió haber presentado una mineralización similar o mayor al maíz en estado vegetativo, por su relación C/N (14.7 y 16.1, respectivamente); sin embargo, la tasa de mineralización del maíz fue mayor por la diferencia en su contenido de lignina ($128 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ y $84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectivamente). Estos resultados indican que la relación C/N por sí misma no es un indicador confiable para evaluar la tasa de descomposición de los residuos lábiles, donde todos los que tienen una relación C/N ≤ 20 deberían presentar en teoría una mineralización neta similar (Tisdale *et al.*, 1999; Chaves *et al.*, 2004), lo cual sí ocurrió para el caso de los residuos cuya concentración de lignina fue $84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ o menor.

En el Cuadro 5 se presentan los parámetros de la ecuación exponencial de la tendencia del porcentaje de permanencia de los residuos evaluados (P_{PR}) respecto al

tiempo (t) entre la semana 5 y 20 de incubación (fracciones no lábiles).

Los parámetros de regresión indican el tiempo de residencia de los residuos evaluados, donde después de 20 semanas de incubación queda $\leq 5\%$ del material orgánico en alfalfa, trébol y maíz (tratamientos 1, 2 y 4, respectivamente). La proporción del material residual de los otros tratamientos fluctuó entre 16.2 y 50.7%. En la Figura 2 se presenta la tendencia de los parámetros de la mineralización del N con la relación C/N.

El aporte de N del residuo más el del suelo se evaluó con base en el N potencialmente mineralizable lábil (primeras cinco semanas de incubación) y no lábil (semana 5 a la 20 de incubación), y su respectivas tendencias con la relación C/N y lignina/N (Figura 3).

Como se aprecia en la figura en discusión, el N potencialmente mineralizable se asoció claramente con los parámetros analizados, siendo el N lábil el que tuvo la tendencia más estrecha con la relación C/N ($R^2=0.92$) y lignina/N ($R^2=0.90$), indistintamente de la calidad de los residuos; sin embargo, la tendencia no lineal de las funciones obtenidas hace ver que no hay cambios significativos en el

CUADRO 5. Parámetros de la ecuación exponencial que describen la tendencia de la permanencia de los residuos evaluados (P_{PR}) respecto al tiempo (t) entre la semana 5 y 20 de incubación.

Parámetros	Tratamientos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$P_{PR} = b_0 e^{(b_1 t)}$									
b_0	224	218	87	111	93	96	79	94	145	366
b_1	-0.24	-0.23	-0.08	-0.16	-0.11	-0.07	-0.05	-0.04	-0.05	-0.10
R^2	0.98	0.97	0.96	0.98	0.93	0.88	0.73	0.83	0.96	0.93

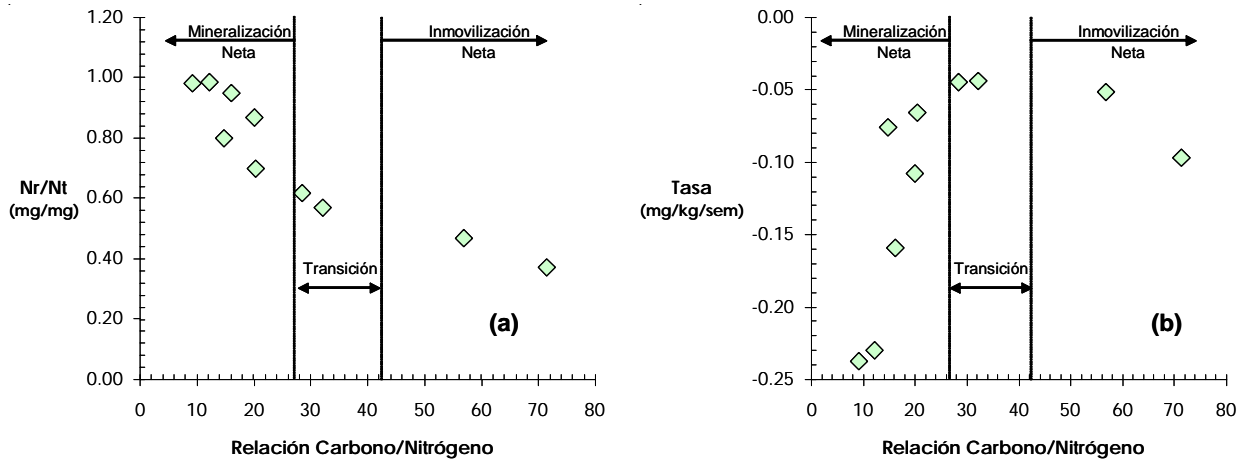


FIGURA 2. Tendencia de los parámetros del N mineralizado entre la semana 5 y 20 de incubación, respecto a la relación C/N de los residuos: a) cociente entre el N mineralizado y el teórico (Nr/Nt); b) tasa de permanencia de los residuos orgánicos evaluados.

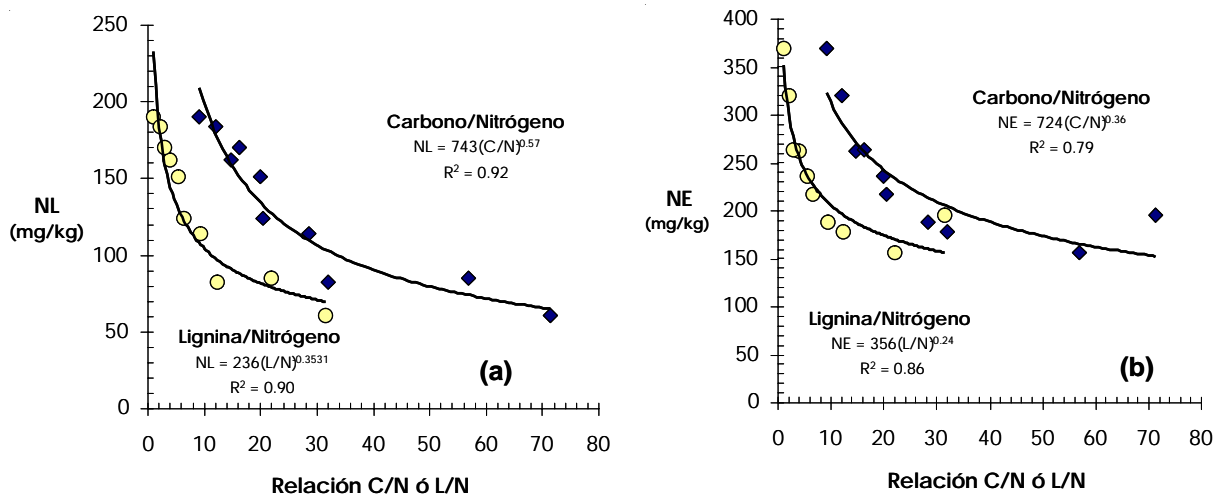


FIGURA 3. N potencialmente mineralizable lábil (NL) y no lábil (NE) como función de la relación C/N ó lignina/N: a) tendencia del NL; b) tendencia del NE.

N lábil y no lábil cuando la relación C/N es cercana o mayor a 30 y la relación lignina/N es mayor que 12. Por lo anterior y con la idea de encontrar un mejor estimador de la capacidad de aporte nitrogenado del suelo y los materiales orgánicos aplicados, se elaboró la Figura 4 donde se presenta la relación del N potencialmente mineralizable lábil y su tasa de mineralización, respecto a la concentración de lignina de los residuos estudiados.

La relación C/N de los residuos orgánicos aplicados es un buen estimador de la mineralización del N orgánico asociado a las fracciones lábiles (primeras cinco semanas

de incubación), siempre y cuando se evalúe de manera integral el aporte de N del suelo junto con el del material orgánico adicionado; sin embargo, dicho parámetro no es eficaz para evaluar sólo la descomposición de los residuos sin considerar el aporte del suelo. En cambio, el contenido de lignina de los materiales orgánicos resultó ser el mejor indicador del proceso de la mineralización, donde su tendencia lineal respecto al N lábil potencialmente mineralizable y tasa de mineralización estiman con mayor precisión la capacidad de aporte de N del suelo más el residuo orgánico aplicado.

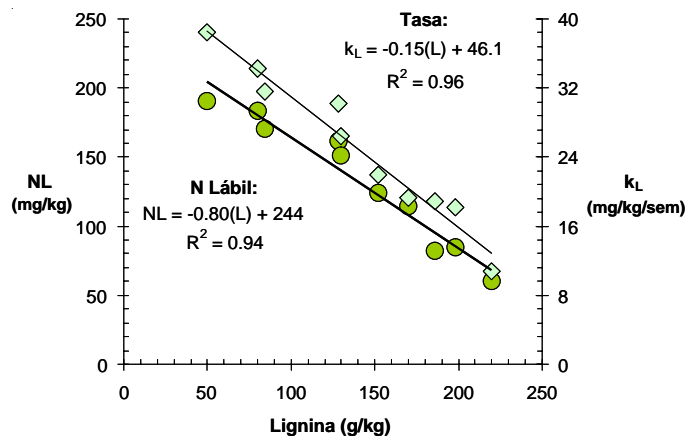


FIGURA 4. Variación del N lábil potencialmente mineralizable (NL) y su tasa de mineralización (k_L), según la concentración de lignina (L) en el residuo.

CONCLUSIONES

1. Con la relación C/N no se detectó diferencias en la mineralización de residuos muy lábiles ($C/N \leq 20.3$). En contraste, la descomposición del material orgánico aplicado se asoció estrechamente ($R^2=0.94$) con la concentración de lignina del residuo, sin que hubiesen diferencias significativas en la tasa de mineralización cuando la concentración de lignina fue $\leq 84 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2. La concentración de lignina del residuo explicó en 94 y 96 % la variación del N lábil potencialmente mineralizable y su tasa de mineralización, respectivamente, con una tendencia lineal en ambos casos.

3. El contenido de lignina de los materiales orgánicos resultó ser un indicador más preciso del proceso de la mineralización de los residuos aplicados al suelo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Fondo Mixto Tlaxcala-CONACYT por el apoyo financiero brindado para el desarrollo de este trabajo a través del proyecto TLAX-C02-12933 "Uso eficiente de los fertilizantes para combatir la contaminación de los suelos de Tlaxcala".

LITERATURA CITADA

- CABRERA, M. L. KISSEL, D. E.; VIGIL, M. F. 2005. N mineralization from organic residues: research opportunities. *Journal of Environmental Quality* 34: 75-79.
- CARLEN, Ch.; NEYROUD, J. A.; CARRON, C. A.; REY, CH. 2004. Effect of different organic nitrogen fertilizers on yield of aromatic and medicinal plants. *Revue Suisse de Viticulture, Arboriculture et Horticulture* 36: 263-267.
- CHAVES, B.; NEVE, S.; DE HOFMAN, G.; BOECKX, P.; CLEEMPUT, O. VAN 2004. Nitrogen mineralization of vegetable root residues and green manures as related to their (bio)chemical

- composition. *European Journal of Agronomy* 21: 161-170.
- DIALLO, M. D.; GUISSÉ, A.; BADIANE-NIANE, A.; SALL, S.; CHOTTE, J. L. 2005. In situ effect of some tropical litters on N mineralization. *Arid Land Research and Management* 19: 173-181.
- EFFLAND, M. J. 1977. Modified procedure to determine acid insoluble lignin in wood and pulp. *Technical Association of the Pulp and Paper Industry* 60(10):143-144.
- ER, F.; OGUT, M.; MACKAYLOV, F. D.; MERMUT, A. R. 2005. Important factors affecting biosolid nitrogen mineralization in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 35: 2327-2343.
- FOX, T. R. 2004. N mineralization following fertilization of Douglas-fir forests with urea in Western Washington. *Soil Science Society of America Journal* 68: 1720-1728.
- GALVIS S., A.; HERNÁNDEZ M., T. M. 2004. Cálculo del nitrógeno potencialmente mineralizable. *Interciencia* 29:377-383.
- GILLIAM, F. S.; LYTTLE, N. L.; THOMAS, A.; ADAMS, M. B. 2005. Soil variability along a nitrogen mineralization and nitrification gradient in a nitrogen-saturated hardwood forest. *Soil Science Society of America Journal* 69: 247-256.
- JEFTS, S. S.; FERNANDEZ, I. J.; RUSTAD, L. E.; DAIL, D. B. 2004. Comparing methods for assessing forest soil net nitrogen mineralization and net nitrification. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 35: 2875-2890.
- JUSSY, J. H.; RANGER, J.; BIENAIMÉ, S.; DAMBRINE, E. 2004. Effects of a clear-cut on the in situ N mineralisation and the N cycle in a 67-year-old Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) plantation. *Annals of Forest Sci.* 61: 397-408.
- LIN YUWEN; LIU TSANGSHEN; WANG CHUNGHU 2003. Study on N mineralization characteristics of organic materials. *J. of Agric. Research of China* 52: 178-190.
- MURPHY, K. L.; KLOPATEK, J. M.; KOPLATEK, C. C. 1998. The effects of litter quality and climate on decomposition along an elevational gradient. *Ecological Applications* 8(4):1061-1071.
- NEVE, S. DE; CSITÁRI, G.; SALOMEZ, J.; HOFMAN, G. 2004. Quantification of the effect of fumigation on short- and long-term nitrogen mineralization and nitrification in different soils. *Journal of Environmental Quality* 33: 1647-1652.
- PAUL, G. C.; SOLAIMAN, A. R. M. 2004. Changes of microbial biomass carbon and nitrogen in upland sugarcane soil amended with different organic materials. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 35: 2433-2447.
- PROBERT, M. E.; DELVE, R. J.; KIMANI, S. K.; DIMES, J. P. 2005. Modelling nitrogen mineralization from manures: representing quality aspects by varying C/N ratio of sub-pools. *Soil Biology & Biochemistry* 37: 279-287.
- PYPERS, P.; VERSTRAETE, S.; CONG PHAN THI; MERCKX, R. 2005. Changes in mineral nitrogen, phosphorus availability and salt-extractable aluminium following the application of green manure residues in two weathered soils of South Vietnam. *Soil Biology & Biochemistry* 37: 163-172.
- RAZGULIN, S. M. 2004. Destruction of soil organic matter and nitrogen assimilation in Southern Taiga ecosystems. *Pochvovedenie*: 927-930.
- RICE, A. H.; PYLE, E. H.; SALESKA, S. R.; HUTYRA, L.; PALACE, M.; KELLER, M.; DE CAMARGO, P. B.; PORTILHO, K.; MARQUES, D. F.; WOFYSY, S. C. 2004. Carbon balance and vegetation dynamics in an old-growth Amazonian forest. *Ecol. Applic.* 14.
- SAS INSTITUTE. 2003. SAS 9.1.3 Service Pack 2, Version 9.1. SAS

Institute Inc., Cary, North Carolina, USA.

TISDALE, S. L.; HAVLIN, J. L.; BEATON, J. D.; NELSON, W. L. 1999. Soil Fertility and Fertilizers, An Introduction to Nutrient Management, 6th Ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

THORNLEY, J. H. M.; JOHNSON, I. R. 1990. Plant and crop modelling. A

mathematical approach to plant and crop physiology. Clarendon press-Oxford. 669 p.

URATANI, A.; DAIMON, H.; OHE, M.; HARADA, J.; NAKAYAMA, Y.; OHDAN, H. 2004. Ecophysiological traits of field-grown *Crotalaria incana* and *C. pallida* as green manure. Plant Production Science 7: 449-455.