



# Utilización de biomasa forestal con fines energéticos: consecuencias en la exportación de nutrientes

Jorge Hernández  
Dpto. Suelos y Aguas - Facultad de Agronomía  
Diciembre 2013

La presente exposición fue también realizada en ocasión del 5° Encuentro de la Sociedad Uruguaya de Ciencia del Suelo (SUCS) en la localidad de Palmar (Dpto. de Soriano), en Noviembre de 2013

## Sistemas de producción del Uruguay

Históricamente: Sistemas de producción:

- extensivos (ganadería, agricultura)
- intensivos (horticultura y fruticultura)

Actualmente:

- cambios en los sistemas de producción tradicionales
- nuevo sistema de producción desde promulgación de Ley N° 15.939: Forestación

Consecuencias: ⇒ Cambios en el uso del suelo

→ Efecto en sostenibilidad del recurso suelo??

## La producción forestal en Uruguay

- Producción de celulosa:
  - turnos de plantación de 10 años
    - ⇒ Una sola cosecha cada 10 años
  - Especies: *Eucalyptus sp.*
- Producción de madera para aserrado
  - turnos de plantación de ~ 15-20 años
    - ⇒ Varias cosechas parciales durante el período
  - Especies: *Eucalyptus grandis* y *Pinus taeda*.

## Destino de la biomasa forestal producida

### En ambos casos:

- 70% de la biomasa producida es madera utilizada por la industria (celulosa y aserrío)
- 30% de la biomasa producida son los restos de cosecha: ramas, corteza, hojas, acículas, los cuales quedan en el sitio de cosecha

## Materiales residuales producidos durante el proceso industrial actual

- Restos de corteza, despuntes
- Aserrín
- Lignina

### Destino

- Consumo por las propias plantas industriales.
- Excedente: - cogeneración de energía para la venta a UTE.
  - Fabricación de pellets para exportar con destino a la producción de energía.

## Nuevas opciones de uso de los productos forestales

### Utilización/producción de biomasa con fines energéticos

- Para uso en el país: (Ej.: conversión a energía eléctrica)
- Para uso fuera del país (exportación de pellets/chips)

## Objetivos de la producción de biomasa con fines energéticos

- Desde el punto de vista medioambiental: sustitución de energía a partir de combustibles fósiles por una fuente renovable, y de esta manera reducir las emisiones de GEI.
- Desde el punto de vista económico: permite reducir las importaciones de petróleo.
- Desde el punto de vista estratégico: contribuye a la diversificación de la matriz energética.

## Con qué alternativas se cuenta?

### Biomasa Residual de otras producciones:

- Biomasa de residuos ganaderos
- Biomasa de residuos agrícolas
- Biomasa de residuos industriales
- Biomasa de residuos forestales

### Biomasa Cultivada específicamente para dichos fines:

- Cultivos Energéticos leñosos
- Cultivos Energéticos herbáceos

## Destino de la biomasa forestal para uso energético

- Combustión directa para producir calor o vapor.
- Co-generación de calor y electricidad con vapor.
- Gasificación de madera y residuos.
- Producción de alcoholes (metanol, etanol).
- Carbonización.

## Aspectos a tener en cuenta para evaluar la factibilidad de uso y sustentabilidad de la producción

### Costos de producción de energía del sistema

→ depende del sistema:

- utilización de restos de cosecha de plantaciones comerciales de celulosa y aserrío
- plantaciones densas con objetivo específico de producción de biomasa

El uso permanente del suelo, ¿es un costo efectivamente considerado en el sistema?

¿Qué costo tiene la exportación de nutrientes y agua?  
¿Qué costo tienen los cambios en propiedades químicas, físicas y biológicas?

## Extracción de nutrientes por especies forestales (producción de celulosa y madera para aserrado)

- Extracción de nutrientes por parte de las especies forestales:  
→ variable, dependiendo del nutriente
- Sin embargo: en las actuales producciones existe reciclaje de nutrientes a través de restos durante la vida del monte (podas, raleos, restos de cosecha)

## Exportación anual promedio de nutrientes en diferentes cultivos

Especie	Biomasa Ton ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	N	P	K	Ca	Mg
		kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>				
Alfalfa (*)	10	200	20	170	125	24
Maíz (planta entera) (*)	20	260	46	172	31	31
Maíz (grano) (*)	10	150	27	37	2	9
Soja (*)	2.5	128	13	39	7	6
Trigo (grano) (*)	3	56	13	14	1	7
<i>Eucalyptus dunnii</i> (**)	16	15	2	10	27	11

**Considerar:**

- Tipo de suelo: fertilidad
- Fertilización: principalmente N, P
- Aportes de nutrientes por otras vías: fijación biológica

(\*Spring, 1979; IIP, 2011)

(\*\*Hernández et al., 2009)

## Características químicas y oferta de nutrientes de los suelos bajo agricultura

Órdenes: Brunosoles, Vertisoles, Argisoles, Planosoles  
Soil Taxonomy: Molisoles y algunos Alfisoles

- Medios a altos contenidos de arcilla
- Medios a altos contenidos de materia orgánica (N, S)
- Ligeramente ácidos
- Medios a altos niveles de Bases de Intercambio: Ca, Mg, K
- Medios a altos contenidos de P (por fertilización)

⇒ suelos de media a alta fertilidad natural

## Características químicas y oferta de nutrientes de los suelos bajo forestación comercial

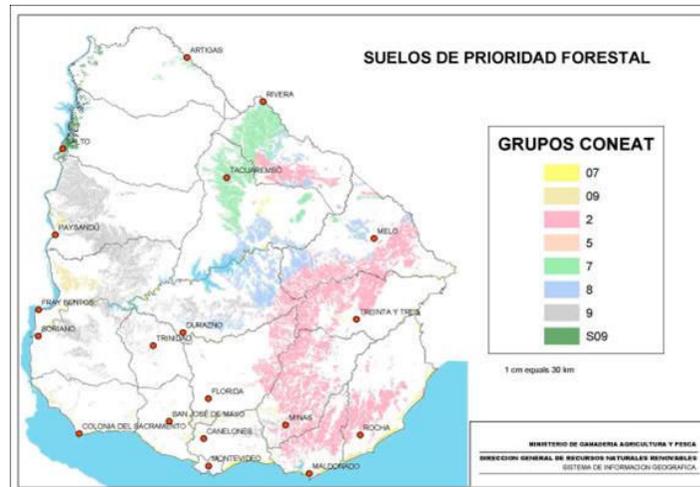
Órdenes: Argisoles, Planosoles, Luvisoles, Acrisoles, Inceptisoles  
Soil Taxonomy: Alfisoles, Ultisoles y algunos Molisoles

- Medios a bajos contenidos de arcilla
- Bajos contenidos de materia orgánica (N, S)
- Ácidos a muy ácidos
- Bajos niveles de Bases de Intercambio: Ca, Mg, K y Na
- Bajos contenidos de P y otros nutrientes (B)
  - ⇒ suelos de baja fertilidad natural
  - ⇒ suelos marginales para otras producciones
  - ⇒ el margen entre Oferta y Demanda de nutrientes es más estrecho que para suelos bajo uso agrícola

## La Materia Orgánica en los suelos de aptitud forestal

- Medios a bajos contenidos de carbono orgánico del suelo:  
< 2.5% (< 1.5% COS)  
COS < 10 kg m<sup>-2</sup> m<sup>-1</sup>; 4 - 6 kg C m<sup>-2</sup> a 20 cm
- Baja estabilidad química de la materia orgánica
  - bajo contenido de arcilla
  - Riesgo potencial de pérdidas alto, principalmente por laboreo de suelos
- Cambios en la dinámica de la materia orgánica:  
acumulación de mantillo, distribución en el perfil

## Suelos de prioridad forestal



Exportación de nutrientes de plantaciones comerciales para producción de celulosa y madera

Situación post-cosecha de una plantación de *Eucalyptus sp.*



Cuántos nutrientes exporta una plantación comercial a término?

## Exportación absoluta de nutrientes en madera comercial de *Eucalyptus sp.* y *Pinus taeda*

Factores: densidad, especie, suelo, duración de la plantación, método de cosecha, etc

Plantaciones a término (10 años)	Árboles ha <sup>-1</sup>	Biomasa Aérea Mg ha <sup>-1</sup>	N	P	K	Ca	Mg
			kg ha <sup>-1</sup>				
<i>E. grandis</i> (1)	1030	189	117	9	80	284	32
<i>E. globulus</i> (2)	970	107	44	5	35	138	26
<i>E. maidenii</i> (3)	1050	199	91	13	65	322	49
<i>E. dunnii</i> (4)	1200	144	132	19	86	240	98
<b>PROMEDIO</b>	<b>1063</b>	<b>160</b>	<b>96</b>	<b>12</b>	<b>67</b>	<b>246</b>	<b>51</b>
<i>P. taeda</i> (15 años)(5)	200	190	157	31	56	106	35

(1) Giosa (2009); (2) Varela (2009); (3) González (2008); (4) Hernández et al., (2009); (5) del Pino et al., (2009)

## Distribución porcentual de biomasa y nutrientes en diferentes componentes de cosecha de *Eucalyptus sp.*

Componente	Biomasa %	N	P	K	Ca	Mg
		% por componente				
Madera	70	27	41	18	17	34
Restos de cosecha	30	73	59	82	83	66
Hoja	4	33	22	15	8	10
Ramas	14	20	11	27	15	17
Corteza	12	20	25	41	59	40

\* *E. globulus*, *E. maidenii* (González, 2008); *E. dunnii* (Hernández et al., 2009)

Exportación porcentual de biomasa y nutrientes según diferentes escenarios para *Eucalyptus sp.*

Componente	Biomasa %	N	P	K	Ca	Mg
		% por componente				
Madera	70	27	41	18	17	34
Madera + corteza	82	47	66	59	76	74
Madera + Corteza + Ramas	96	67	78	85	92	90
Total	100	100	100	100	100	100

\* *E. globulus*, *E. maidenii* (González, 2008); *E. dunnii* (Hernández et al., 2009)

Exportación de biomasa y nutrientes según diferentes alternativas de uso de biomasa por *Eucalyptus sp.*  
(promedio 10 años)

Componente	Biomasa Aérea Mg ha <sup>-1</sup>	N	P	K	Ca	Mg
		kg ha <sup>-1</sup>				
Madera	147	91	15	81	301	58
Madera + corteza	170	145	21	193	1072	108
Madera + Corteza + Ramas	200	205	26	285	1290	139
Total árbol	208	325	34	337	1402	154

(González, 2008; Hernández et al., 2009; Hitta y Lorenzo, 2012)

Extracción de nutrientes por cosecha de *E. maidenii*  
de 10 años (1050 árboles por há, Alfic Argiudol)

Componente	Biomasa Aérea Mg ha <sup>-1</sup>	N	P	K	Ca	Mg
		kg ha <sup>-1</sup>				
Madera	147	91	5	81	301	58
Restos	61	234	29	256	1101	96
Total	208	325	34	337	1402	154

(González, 2008; Hernández et al., 2009; Hitta y Lorenzo, 2012)

Exportación anual promedio de nutrientes  
en diferentes cultivos

Especie	Biomasa Ton ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	N	P	K	Ca	Mg
		kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>				
Alfalfa (*)	10	200	20	170	125	24
Maíz (planta entera) (*)	20	260	46	172	31	31
Maíz (grano) (*)	10	150	27	37	2	9
Trigo (grano) (*)	3	56	13	14	1	7
Soja (*)	2.5	128	13	39	7	6
<i>E. dunnii</i> (SC) (**)	16	15	2	10	27	11
<i>E. dunnii</i> (CC) (**)	(19)	22	3	24	114	18
<i>E. dunnii</i> (biomasa total) (**)	(28)	55	6	52	166	27

(\*Spring, 1979; IIP, 2011)

(\*\*Hernández et al., 2009)

¿Qué consecuencias tienen sobre el suelo estas exportaciones de nutrientes?

Parámetros químicos de suelos del grupo CONEAT 2 bajo pasturas y luego de un turno de plantación de *E. globulus* de 10 años (7 sitios)

Hor.	Uso	pH	Ca	Mg	K	Na	BT	A.I.	CIC	SB	COS
			cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>						%	g kg <sup>-1</sup>	
A	Past	5.1	2.72	1.57	0.41	0.34	5.03	0.65	5.67	88	17.0
	For.	4.9	2.16	1.51	0.38	0.40	4.45	1.47	5.92	75	18.4
B	Past	5.3	4.37	3.67	0.42	0.58	9.03	1.13	10.16	83	9.48
	For.	5.4	5.38	4.64	0.42	0.72	11.15	1.68	12.84	79	9.30

(Varela, 2009)

Promedios Hor. A: disminución de 0.2 unidades de pH  
aumento de 0.82 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de A.I.  
disminución del 21% de Ca int., 4% de Mg int. y 7% de K int.

Parámetros químicos de suelos del grupo CONEAT 7  
bajo pasturas y un turno de plantación de *E. grandis* de  
15 años (4 sitios)

Hor.	Uso	pH	Ca	Mg	K	Na	BT	A.I.	CIC	SB	COS
			cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>						%	g kg <sup>-1</sup>	
A	Past	4.9	1.25	0.49	0.23	0.39	2.35	0.52	2.88	83	11.7
	For.	4.4	0.59	0.30	0.15	0.30	1.34	1.29	2.62	51	11.0
B	Past	4.8	2.05	1.01	0.36	0.41	3.82	1.87	5.69	71	8.3
	For.	4.5	1.40	0.87	0.19	0.36	2.82	3.21	6.04	48	8.5

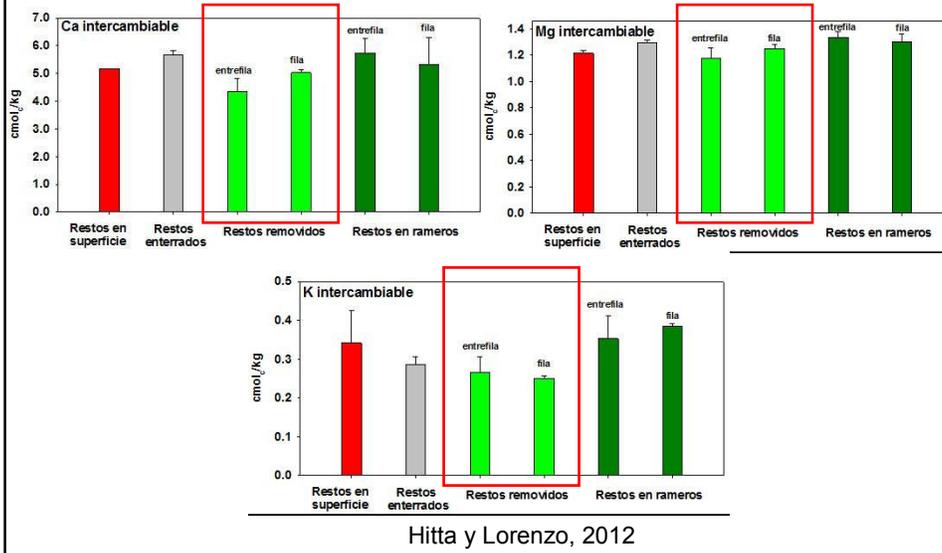
Promedios Hor. A: disminución de 0.5 unidades de pH (Cabrera y Cal, 2008)  
aumento de 0.77 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de A.I.  
disminución del 53% del Ca int., 39% del Mg int. y 35% del K int.

Cambios en los niveles de bases en el suelo en función  
de las cantidades exportadas por las trozas

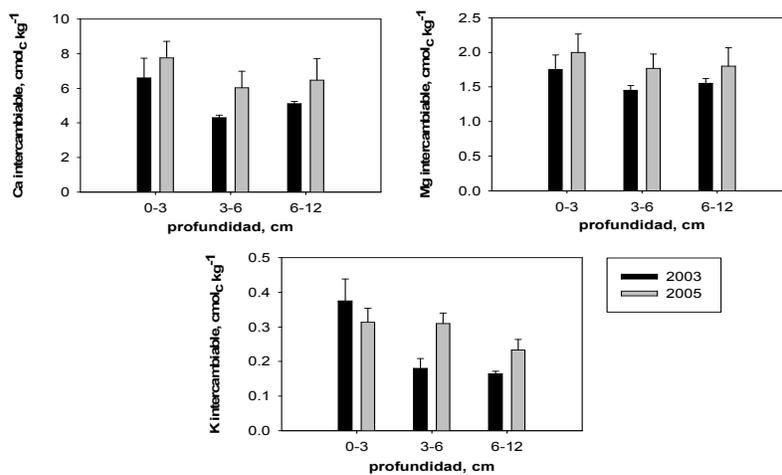
	Ca	Mg	K
Hor. A (28 cm) bajo Pasturas (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	2.72	1.57	0.41
Hor. A (28 cm) bajo <i>E. globulus</i> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	2.16	1.51	0.38
Disminución en (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0.56	0.06	0.03
Disminución en %	21	4	7
Disminución en kg/ha	392	25	41
Exportación madera en kg/ha	138	26	35

(Varela, 2009)

### Concentración de nutrientes en el suelo (0-20 cm) a los 12 meses de una reforestación de *E. grandis* en un suelo del Grupo CONEAT 9.6



### Cambios en el contenido de bases de intercambio luego de 2 años de descomposición de restos de cosecha de *E. dunnii*



## Aporte de nutrientes del mantillo forestal (2 años de evaluación)

Especie	Año	Biomasa	C	N	P	K	Ca	Mg
		Mg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>					
<i>E. dunnii</i>	0	18	9	114	8	34	357	28
	2	8	4	105	7	9	232	11
<i>P. taeda</i>	0	14	7	113	6	14	61	8
	2	11	5	118	1	4	33	4

(Hernández et al., 2012)

## Plantaciones densas con destino a la producción de energía

- Densidades de plantación para producciones de celulosa y aserrado (iniciales): 3 x 3 m ~ 1.111 plantas ha<sup>-1</sup>
- Densidades de plantación para producciones de biomasa con fines energéticos:
  - 3 x 1.5 m = 2.222 plantas ha<sup>-1</sup>
  - 3 x 1.0 m = 3.333 plantas ha<sup>-1</sup>
  - 3 x 0.75 m = 4.444 plantas ha<sup>-1</sup>
  - 3 x 0.5 m = 6.666 plantas ha<sup>-1</sup>
- Duración de las plantaciones: ~ 4 años
- Usos: pellets (exportación), calor, carbón, termo-electricidad (co-generación)

## Plantación de Eucalyptus de alta densidad



### Nutrientes acumulados en la biomasa aérea y el mantillo de *E. grandis* en función de la edad y la densidad de plantación en un suelo tropical (oxisol)

Nutrient	Component	PD	Equation	Pt. max	R <sup>2</sup>
		trees ha <sup>-1</sup>		yr	
N	AG + FF	5,000	$\hat{y} = 9.0134 + 64.3500 SA$	6.75 <sup>(1)</sup>	0.971
	AG + FF	1,667	$\hat{y} = 7.9072 + 58.011 SA$	6.75 <sup>(1)</sup>	0.957
	AG + FF	500	$\hat{y} = -7.517 + 48.834 SA$	6.75 <sup>(1)</sup>	0.981
P	AG + FF	5,000	$\hat{y} = -0.5718 + 7.7218 SA - 0.5886 SA^2$	6.56	0.977
	AG + FF	1,667	$\hat{y} = -0.7539 + 6.9146 SA - 0.6148 SA^2$	5.62	0.955
	AG + FF	500	$\hat{y} = -0.40909 + 2.5185 SA$	6.75 <sup>(1)</sup>	0.981
K	AG + FF	5,000	$\hat{y} = -16.1964 + 108.832 SA - 8.4821 SA^2$	6.41	0.982
	AG + FF	1,667	$\hat{y} = -17.1780 + 95.000 SA - 8.033 SA^2$	5.91	0.936
	AG + FF	500	$\hat{y} = 0.5995 + 34.881 SA$	6.75 <sup>(1)</sup>	0.858
Ca	AG + FF	5,000	$\hat{y} = -19.345 + 144.369 SA - 15.4417 SA^2$	4.67	0.984
	AG + FF	1,667	$\hat{y} = -15.662 + 117.179 SA - 12.9418 SA^2$	4.53	0.983
	AG + FF	500	$\hat{y} = -11.138 + 84.960 SA - 8.0880 SA^2$	5.25	0.990
Mg	AG + FF	5,000	$\hat{y} = -1.3628 + 19.7052 SA - 1.6102 SA^2$	6.12	0.968
	AG + FF	1,667	$\hat{y} = -2.3958 + 20.718 SA - 2.0245 SA^2$	5.12	0.995
	AG + FF	500	$\hat{y} = 1.46279 + 6.9808 SA$	6.75 <sup>(1)</sup>	0.937

<sup>(1)</sup> Estimated age of maximum.

(Leite et al., 2011)

Nutrientes acumulados en la biomasa aérea y el mantillo de *E. grandis* de 4 años en función de la densidad de plantación

Nutriente	Árboles ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>
N	5000	266
	1667	240
	500	188
P	5000	21
	1667	17
	500	10
K	5000	283
	1667	234
	500	140
Ca	5000	311
	1667	246
	500	199
Mg	5000	51
	1667	48
	500	29

(según Leite et al., 2011)

## En resumen:

- Los suelos aptos para la producción forestal en Uruguay son de media a baja fertilidad, con reducido aporte de nutrientes, y escasos mecanismos de reposición de nutrientes disponibles (geología, materia orgánica).
- La magnitud de las extracciones realizadas por la biomasa forestal es variable, dependiendo de varios factores, particularmente del nutriente y de qué componentes de la biomasa son retirados del sitio.
- Se ha observado una disminución en la concentración de nutrientes en el suelo ya en turnos de plantación de 10 años.
- Existe -no obstante- una redistribución de nutrientes en el sitio, donde los restos y el mantillo constituyen una reserva potencial de nutrientes para la futura plantación.
- El aumento de la densidad de plantación, así como el retiro de la totalidad de la biomasa de las actuales plantaciones para producción de madera o celulosa en forma permanente comprometen la sostenibilidad del sistema.

## En resumen:

- No obstante, se requiere información nacional que permita cuantificar la magnitud de las exportaciones de nutrientes en plantaciones densas y su impacto en el suelo y sustentabilidad del sistema.
- Surge importante el monitoreo de todas las situaciones de producción, a los efectos de evaluar los cambios en propiedades de suelo y su posibilidad de corrección.

