

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**PRODUCTIVIDAD DE CULTIVOS LIGNOCELULÓSICOS EN EL URUGUAY: VARIABLES
DE MANEJO**

por

María Virginia VIANA OTERO

**TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Magíster en Ciencias Agrarias opción
Ciencias Vegetales**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
octubre 2014**

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Msc. Oswaldo Ernst, Dr. Mario Pérez Bidegayn y Dr. Pablo Boggiano, el 8 de 10 de 2014. Autora: Ing. Agr. María Virginia Viana Otero. Director Dr. Guillermo Siri Prieto.

**Dedico este trabajo a mi familia
y especialmente a Andrés.**

AGRADECIMIENTOS

Rita Herrera, Guillermo Siri Prieto, Gonzalo Abal, Pedro Curto, Ma. Laura DiMartini, Alejandra Pigatto, Hernán Rodríguez, a los funcionarios del laboratorio 1 de la EEMAC, a mi familia y amigos.

TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VII
SUMMARY.....	VIII
 1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	 1
 2. <u>RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN CULTIVOS</u> <u>LIGNOCELULÓSICOS</u>	 4
2.1. RESUMEN	4
2.2. SUMMARY	5
2.3. INTRODUCCIÓN.....	6
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
2.4.1. <u>Ubicación del experimento</u>	8
2.4.2. <u>Evaluación de la producción</u>	8
2.4.3. <u>Evaluación de propiedades químicas del suelo</u>	9
2.4.4. <u>Análisis estadístico</u>	9
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	10
2.5.1. <u>Producción de materia seca</u>	10
2.5.2. <u>Contenido de humedad</u>	15
2.5.3. <u>Carbono en el suelo</u>	15
2.5.4. <u>Fósforo en el suelo</u>	17
2.5.5. <u>Potasio en el suelo</u>	18
2.5.6. <u>Potasio en la biomasa</u>	19
2.5.7. <u>Nitrógeno en el suelo</u>	21
2.6. CONCLUSIONES.....	22
2.7. BIBLIOGRAFÍA.....	24

3. <u>PRODUCCIÓN DE BIOMASA DE CULTIVOS LIGNOCELULÓSICOS SEGÚN EL NÚMERO DE CORTES</u>	31
3.1. RESUMEN.....	31
3.2. SUMMARY.....	32
3.3. INTRODUCCIÓN.....	33
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
3.4.1. <u>Ubicación del experimento</u>	35
3.4.2. <u>Evaluación de la producción</u>	36
3.4.3. <u>Evaluación de propiedades químicas del suelo</u>	37
3.4.4. <u>Análisis estadístico</u>	37
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
3.5.1. <u>Producción de materia seca</u>	38
3.5.2. <u>Contenido de humedad</u>	41
3.5.3. <u>Carbono en el suelo</u>	42
3.5.4. <u>Fósforo en el suelo</u>	43
3.5.5. <u>Potasio en el suelo</u>	44
3.5.6. <u>Potasio en la biomasa</u>	45
3.5.7. <u>Nitrógeno en el suelo</u>	46
3.5.8. <u>Contenido de cenizas</u>	47
3.5.9. <u>Poder calorífico</u>	48
3.6. CONCLUSIONES.....	48
3.7. BIBLIOGRAFÍA.....	50
 4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	 55
4.1. PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA.....	55
4.2. CONTENIDO DE HUMEDAD.....	55
4.3. CARBONO EN EL SUELO.....	55
4.4. FÓSFORO EN EL SUELO.....	56
4.5. POTASIO EN EL SUELO Y LA BIOMASA.....	57
4.6. NITRÓGENO EN EL SUELO.....	57
4.7. CONTENIDO DE CENIZAS Y PODER CALORÍFICO.....	58

5. <u>CONCLUSIONES</u>	58
6. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	60

RESUMEN

En Uruguay, al estar ubicado en una región sub tropical y poseer suelos sin limitaciones severas de productividad, sería posible la introducción de cultivos de gramíneas lignocelulósicas en la matriz energética. En el departamento de Paysandú se evaluaron durante los años 2012 y 2013 tres especies: *Arundo donax*, *Pennisetum purpureum*, y *Panicum virgatum* que habían sido sembradas en el 2007. Se realizaron dos experimentos en los que se cuantificó: experimento 1, respuesta a la fertilización con N y P de las diferentes especies; experimento 2, respuesta al número de cortes por año (uno vs. dos). *Arundo donax* produjo más biomasa seca que *P.purpureum* en los dos experimentos, la producción de *P.virgatum* fue intermedia. El N aumentó la producción de las tres especies a razón de 65,5 kg MS ha⁻¹ año⁻¹ kg⁻¹N. No se observó respuesta al agregado de P. Una única cosecha (agosto) produjo más que la suma de dos cosechas en las tres especies. Con la única cosecha de agosto se lograría un material con menor contenido de cenizas y humedad. Como era de esperar la mayor producción de energía se logró con *A.donax* (407 GJ ha⁻¹ año⁻¹) al cosecharlo una sola vez. Pensando en toda la logística para la producción de energía (costos de transporte y procesamiento), *P.virgatum* sería la especie más promisoría a pesar de la menor producción de energía cosechada por área (292 GJ ha⁻¹ año⁻¹) debido a su menor contenido de humedad (15 %) comparada a las otras especies.

Palabras clave: cosecha, cultivos energéticos, fertilización

LIGNOCELLULOSIC CROP PRODUCTIVITY IN URUGUAY: MANAGEMENT VARIABLES

SUMMARY

In Uruguay, due to its location in a subtropical region and not having severe soil limitations, it is possible to introduce crops of lignocellulosic grasses in the energy matrix. In Paysandú, in 2007, three species were grown: *Arundo donax*, *Pennisetum purpureum* and *Panicum virgatum*. They were evaluated during the years 2012 and 2013. Two experiments were performed in which it was quantified; in number 1, differences in production of August between the three species and response to fertilization with N and P; in experiment 2, the difference in production among the three species and the differences in harvesting in January and August or only August. *Arundo donax* produced greater dry biomass in the two experiments than *P. purpureum*, *P. virgatum* production was intermediate. The N increased the production of the three species at a rate of 65.5 kg.MS ha⁻¹.y⁻¹ kg N⁻¹. *Arundo donax* was the most responsive, 69.8 kg.MS ha⁻¹.y⁻¹ kg N⁻¹. No response was observed to the addition of P. The single harvest in August produced more than the January and August harvest for the three species. With the single August harvest, a material with lower ash and moisture content would be achieved. As it was expected, higher energy output was achieved with *A. donax* (407 GJ ha⁻¹.y⁻¹) in only one harvest. Taking into account all the logistics for the production of energy (transport costs and processing), it would be good to cultivate *P. virgatum* despite lower energy production, 292 GJ ha⁻¹.y⁻¹, because of its lower moisture content (15%) compared to the other species. It would be desirable also to fertilize with N and make a single harvest in August.

Keywords: energy crops, fertilization, harvest

1. INTRODUCCIÓN

El aumento del precio del combustible fósil y la necesidad de reducir la emisión de gases de efecto invernadero, estimuló el aumento de la producción global de energía renovable a partir de biomasa, particularmente a partir del año 2000 (Ra *et al.* 2012). La producción de energía a partir de biomasa tiene menos efectos negativos en el ambiente que los combustibles fósiles, debido a que no ingresa dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera y son renovables. La conversión de energía por la quema de cultivos energéticos es una posibilidad atractiva para satisfacer las demandas de fuentes de energía menos contaminantes que los combustibles fósiles y satisfacer las demandas incrementadas a futuro (Ma *et al.* 2000, McLaughlin *et al.* 1999) y proporcionar oportunidades económicas para el desarrollo rural (Tulbure *et al.*, 2012).

Uruguay no produce combustibles fósiles por lo que es dependiente de su importación. En el año 2012 el petróleo y sus derivados, representaron el 24 % del total de importaciones, lo que equivalió al 33 % de las exportaciones. Por lo tanto, es necesario desarrollar políticas que atenúen los impactos del consumo de petróleo en la economía (Dirección Nacional de Energía, 2012). En los últimos años se buscaron soluciones para los escenarios futuros de riesgo económico y social del país. Una de las metas planteadas es diversificar la matriz energética aumentando principalmente la participación de las energías renovables. En Uruguay la producción de energía a través de la biomasa (leña, carbón vegetal, residuos de biomasa y otras materias primarias para biocombustibles) ha ido aumentando su participación en los últimos 5 años y en el año 2012 pasó a ser la segunda fuente en energía, con 29 % de participación en la matriz de abastecimiento (Dirección Nacional de Energía, 2012).

En los últimos años en los países desarrollados, se implementa la generación de energía a partir de cultivos lignocelulósicos, llamados cultivos energéticos de 3^{era} generación. Mediante procesos físicos y químicos, se extrae celulosa, hemicelulosa y lignina, que se utilizan como fuente de energía. Entre las especies más utilizadas de cultivos lignocelulósicos se encuentran, *Arundo donax* (Caña común), *Pennisetum purpureum* (Pasto elefante) y *Panicum virgatum* (Switchgrass). *P. virgatum* es una gramínea perenne, de clima cálido (C₄), nativa del

este, sur de Canadá y gran parte de Estados Unidos. Esta especie ha sido identificada como un cultivo energético herbáceo ideal en Estados Unidos (Zan *et al.*, 2001). *Arundo donax* es una gramínea perenne de crecimiento rápido, nativo del este de Asia y extendido en todo el Mediterráneo. Tiene un ciclo fotosintético tipo C₃, pero tiene altas tasas de fotosíntesis y productividad similar a las especies de ciclo C₄ (Nassi o Di Nasso *et al.* 2010, Angelini *et al.* 2009). *Pennisetum purpureum* es una gramínea perenne rizomatosa estival, originaria de África tropical. Es una planta C₄, las bajas temperaturas son la mayor limitante para su producción y en general no resiste la sequía prolongada (Bemhaja, 2000). En Italia Angelini *et al.* (2009, 2005) citan para *A. donax*, rendimientos de 23 a 37,7 Mg ha⁻¹ año⁻¹. En *P. virgatum* se cita en promedio, rendimientos entre 8 y 10 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Schmer *et al.* 2008, Heaton *et al.* 2004, Piscioneri y Pignatelli 2003, Lemus *et al.* 2002). Searle y Malins (2014), sugieren que los rendimientos intermedios obtenidos (5 a 10 Mg ha⁻¹ año⁻¹) se asocian a zonas de clima templado. Fontoura *et al.* (2014) consideraron una variación de rendimiento de 20 a 40 Mg ha⁻¹ año⁻¹, al momento de evaluar la conveniencia de este cultivo para la producción de energía.

Dentro de los efectos ambientales positivos de la producción de energía a partir del cultivo de especies perennes se destaca la posibilidad de provocar ganancias de carbono en el suelo, ya que la intensidad de laboreo es baja, mientras la cobertura del suelo y la producción de biomasa son alta (Angelini *et al.* 2009, Boehmel *et al.* 2008, McLaughlin y Kszos 2005). Es reconocida la importancia del carbono del suelo en determinar la fertilidad, retención de nutrientes, minerales, retención y degradación de agroquímicos, promover el crecimiento radicular, incidir en la dinámica del agua y del aire (Bohn *et al.*, 1993). Este efecto positivo sobre la fertilidad del suelo aporta además, al balance de carbono del sistema en su conjunto.

La producción de energía a partir de la biomasa debe poseer un balance de energía positivo. Los principales gastos de energía en la producción de cultivos lignocelulósicos son la fertilización, principalmente con N y la cosecha, acorde a lo expuesto por Nassi o Di Nasso *et al.* (2010), Fike *et al.* (2006) y Heaton *et al.* (2004). Los resultados obtenidos por McLaughlin *et al.* (1999), muestran la importancia de ambos manejos en cultivos de *P. virgatum*, ya que con una sola cosecha lograron reducir hasta un tercio del total el costo del nitrógeno. Cuando el cultivo cosechado es usado para la combustión directa, el uso de energía en el proceso de

transformación es mínimo. De esta forma, la relación entre la energía ingresada y la producida en estos sistemas, puede ser menor a 0,2, mientras en la producción de etanol a partir de maíz o de biodiesel de canola, pueden ser ≥ 0.8 (Heaton *et al.*, 2004).

En Uruguay existe escasa información acerca de la producción de cultivos lignocelulósicos, por lo que es necesario generar información acerca de la producción de *A.donax*, *P.virgatum* y *P.purpureum*. La disponibilidad de N y P en el suelo, así como el número de cortes, podrían limitar el rendimiento de estos cultivos. Una adecuada fertilización y número de cortes anuales, incrementarían la producción de biomasa y cambiaría la calidad de la misa. Dado el costo energético de estas prácticas de manejo y la variabilidad de producción esperada entre especies, se planteó identificar el cultivo, fertilización y número de cortes, que maximizaría la producción de energía. La cantidad de biomasa producida y su composición mineral, determinarían diferencias en la extracción de nutrientes y en la composición química del recurso suelo. Se evaluaron, por lo tanto, las diferencias generadas por estas prácticas en la composición química del suelo, con el objetivo de aportar información acerca de la sostenibilidad del recurso.

2. Respuesta a la fertilización de nitrógeno y fósforo en cultivos lignocelulósicos

Response to nitrogen and phosphorus fertilization in lignocellulosic crops

2.1. Resumen

Los cultivos lignocelulósicos se han desarrollado como alternativa en la matriz energética. Tres especies de interés en Uruguay son *Arundo donax*, *Pennisetum purpureum* y *Panicum virgatum*. En estos cultivos la fertilización nitrogenada es el mayor insumo energético. El objetivo fue comparar la producción de éstas tres especies, cuantificar la respuesta al agregado de nitrógeno, fósforo y sus efectos en el carbono del suelo luego de 6 años. Los cultivos se instalaron en 2007 y se evaluaron desde enero del 2012 a agosto del 2013. Los tratamientos de fertilización consistieron en: 1. testigo sin fertilización; 2. 100 kg ha⁻¹ de N; 3. 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅; y 4. 100 kg ha⁻¹ de N y de P₂O₅. *Arundo donax* con una producción de 18,6 Mg ha⁻¹ año⁻¹ produjo más que *P.purpureum*, con una producción de 14,9 Mg ha⁻¹ año⁻¹, mientras *P.virgatum* tuvo valores intermedios, 15,6 Mg ha⁻¹ año⁻¹. La fertilización con N aumentó 50 % la producción en las tres especies, aunque en *A.donax* el incremento no fue significativo. No hubo respuesta a la fertilización con P. Las diferencias en producción de biomasa no generaron diferencias de contenidos de carbono en el suelo, al término de la evaluación. Pese a los rendimientos intermedios de *P.virgatum*, fue la especie que presentó menor contenido de humedad (16%), lo que es favorable como materia prima para la producción de energía. Los rendimientos fueron los esperables para nuestra región, con variabilidad anual atribuible a las condiciones climáticas y se pueden aumentar al fertilizar con N.

Palabras clave: *Arundo donax*, cultivo energético, *Panicum virgatum*, *Pennisetum purpureum*

2.2. Summary

Lignocellulosic crops have been developed as an alternative in the energy matrix. Three species of interest in Uruguay are *Arundo donax*, *Pennisetum purpureum* and *Panicum virgatum*. In these crops nitrogen fertilization is the largest energy input. The objective was to compare the production of these three species, quantify the response to the addition of nitrogen and phosphorus and compare the final carbon content in the soil. The cultures were installed in 2007 and were evaluated from January 2012 to August 2013. The fertilization treatments, after cutting were: witness without fertilization; 100 kg ha⁻¹ N; 100 kg ha⁻¹ of P₂O₅; and 100 kg ha⁻¹ of N and P₂O₅. The production was higher in 2013. *Arundo donax*, with a production of 18.6 Mg ha⁻¹ y⁻¹, produced more than *P. purpureum*, with a production of 14.9 Mg ha⁻¹ y⁻¹, while *P. virgatum* had intermediate values, 15.6 Mg ha⁻¹ y⁻¹. N fertilization increased production by 50% in the three species, though in *A. donax* the increase was not significant. There was no response to fertilization with P. Differences in biomass production did not generate differences in soil carbon content at the end of the evaluation. In spite *P. virgatum* intermediate outputs, it was the species with lower moisture content (16 %), which is favorable as raw material for energy production. The outputs were the expected ones for our region, with an annual variability attributable to climatic conditions and that can be increased with fertilization with N.

Keywords: *Arundo donax*, crops energy, *Panicum virgatum*, *Pennisetum purpureum*

2.3. Introducción

En los últimos años los cultivos energéticos se han desarrollado a nivel mundial como una alternativa viable a incorporar en la matriz energética, reemplazando combustibles fósiles y por lo tanto disminuyendo el CO₂ atmosférico. Se los utiliza como fuentes de energía a través de la combustión directa, producción de gas, u otro tipo de energía envasada. Otra posible ventaja atribuible a los cultivos lignocelulósicos sería la acumulación de materia orgánica en el suelo. La alta producción de biomasa aumentaría el carbono orgánico del suelo (COS), el ciclo perenne disminuiría las pérdidas de este COS a consecuencia de la respiración y erosión del suelo (Angelini *et al.*, 2009, Boehmel *et al.*, 2008). McLaughlin *et al.* (1999) observaron incremento de COS asociado al alto rendimiento de *Panicum virgatum* y disminución de la erosión, debido al ciclo perenne de producción. Zan *et al.*, (2001) sugieren que los cultivos perennes tienen el potencial de acumular mayor cantidad de COS que los cultivos anuales.

En Uruguay, dentro de una gran variedad de especies potenciales para generar biomasa, se iniciaron estudios en tres especies: *Arundo donax* (Caña común), *Pennisetum purpureum* (Pasto elefante) y *Panicum virgatum* (Switchgrass). *Arundo donax* es de las más utilizadas en Europa, *P.virgatum* está ampliamente difundida en Estados Unidos, mientras *P.purpureum* se cultiva en varias regiones. El ciclo estival de *P.purpureum* y *P.virgatum* es del tipo metabólico fotosintético C₄, mientras *A.donax* es tipo C₃ con desarrollo estival (Angelini *et al.*, 2009).

Es deseable que estos cultivos posean bajos valores de contenidos de humedad, ya que esto disminuye los costos de transporte, almacenamiento y secado previo a su utilización como materia prima. McLaughlin *et al.* (1999) cuantificaron para *P.virgatum* un contenido de humedad de 15 %. Smith y Slater (2011) para *A.donax*, reportaron contenidos de 14 a 30 % de humedad, mientras Dragoni *et al.* (2011), observaron valores de hasta 61 % en este cultivo. En la especie *P.purpureum* se han reportado contenidos de humedad entre 65 (Ukanwoko y Igwe, 2012) y 78 % (Zetina *et al.* 2013; Ribeiro *et al.*, 2014), con cortes realizados en estado vegetativo o con una frecuencia de corte de 60 días. El contenido de cenizas en la biomasa puede ser un problema para la industria y dentro de la cenizas el

potasio es uno de los elementos más problemáticos (McLaughlin *et al.*, 1999; Jenkins *et al.*, 1998).

En los sistemas de producción de cultivos energéticos los balances de energía deberían ser positivos. Los principales gastos de energía en la producción de cultivos lignocelulósicos son la fertilización, principalmente con N, acorde a lo expuesto por Nassi o Di Nasso *et al.* (2010), Fike *et al.* (2006) y Heaton *et al.* (2004). La fertilización con N y P, sin embargo, ha incrementado el rendimiento en estos cultivos. En *P.virgatum*, Searle y Mallins (2014), recomiendan fertilizar con no más de 56 kg ha⁻¹ año⁻¹ N. Haque *et al.* (2009) observaron respuestas de 100 kg MS kg⁻¹ N, mientras Pedroso *et al.* (2014) y Owens *et al.* (2013), observaron respuesta de 55 kg MS kg⁻¹ N. El nivel óptimo de respuesta en biomasa total se obtuvo con 80 kg ha⁻¹ año⁻¹ N según Boehmel *et al.* (2008). En el cultivo de *P.purpureum*, Bemhaja (2000) observó el máximo rendimiento al fertilizar con 100 unidades de N y 100 unidades de P. Sharma *et al.* (2012) obtuvieron el mayor beneficio económico con 80 kg ha⁻¹ N y 20 Mg ha⁻¹ de estiércol. La respuesta observada por estos autores fue de 55 a 117 kg MS ha⁻¹ año⁻¹ kg⁻¹ N. En *A.donax*, Angelini *et al.* (2005) obtuvieron rendimientos de 23 a 27 Mg ha⁻¹ año⁻¹ con 200 kg ha⁻¹, 80 kg ha⁻¹ y 200 kg ha⁻¹, de N, P y K respectivamente. En el año 2009, Angelini *et al.* (2009) observaron rendimientos mayores, 28,7 Mg ha⁻¹ año⁻¹, al fertilizar con 100 kg ha⁻¹, 100 kg ha⁻¹ y 100 kg ha⁻¹, de N, P y K respectivamente.

En Uruguay existe escasa información acerca de la producción de materia seca de los cultivos anteriormente mencionados. Es posible que estos cultivos tengan diferente potencial ya que provienen de ambientes diferentes y que la disponibilidad de los nutrientes, N y P, podría limitar la producción de biomasa en los tres cultivos. Se planteó como objetivo identificar el cultivo de mayor rendimiento potencial, mejor calidad de biomasa (% humedad y bajos tenores de nutrientes en los mismos) y la respuesta a la fertilización con ambos nutrientes. Al ser cultivos perennes y de alta producción de biomasa, es posible que haya diferencias en la composición química del suelo luego de 6 años de iniciado el experimento, debido a cambios en los procesos de ganancia y pérdida de COS, así como diferencias en la extracción de nutrientes. Se comparó el contenido de COS del suelo, K, N y P, al término del experimento, con el objetivo de identificar el impacto de cada cultivo y manejos de fertilización, en el recurso suelo.

2.4. Materiales y métodos

2.4.1. Ubicación del experimento

El experimento se realizó en la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” (EEMAC) de la Facultad de Agronomía, UdelaR, ubicada en el departamento de Paysandú (32 ° 21 ' S y 58 ° 02 'W; 61 m de altitud) en Uruguay. Sobre suelos clasificados como Brunosoles Eutricos Típicos Fr de la unidad cartográfica San Manuel (Altamirano *et al.*, 1976).

Los cultivos energéticos que se evaluaron fueron *Panicum virgatum* (*P.virgatum*), *Arundo donax* (*A.donax*) y *Pennisetum purpureum* (*P.purpureum*). Los cultivos se instalaron en primavera de 2007 y se manejaron de la misma forma hasta el final del período de evaluación. El período de evaluación aquí presentado se realizó desde enero del 2012 a agosto del 2013. *Panicum virgatum* se cultivó de semilla con una población objetivo de 100 plantas m⁻², *P.purpureum* y *A.donax* se cultivaron por esquejes, con una población objetivo de 2 plantas m⁻². Cada parcela posee un área de 15 m² (3 m x 5 m). Las cosechas en este experimento se realizan en agosto. El experimento se diseñó en bloques completos al azar con tres repeticiones.

Los tratamientos de fertilización consistieron en: 1. un testigo sin fertilización; 2. 100 kg ha⁻¹ de nitrógeno (N) agregado en forma de urea; 3. 100 kg ha⁻¹ de fosfato (P₂O₅) agregado como supertriple; 4. 100 kg ha⁻¹ de N mas 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Las fertilizaciones se realizaron un mes posterior a cada cosecha (setiembre).

2.4.2. Evaluación de la producción

La cosecha se realizó con cuchilla, dejando un corte remanente de aproximadamente 10 a 15 cm de altura.

En cada cosecha, para la determinación de materia seca se pesó una muestra fresca (aproximadamente 1 kg) se trozó a fracciones de 5 cm y secó a 60 °C durante 48 horas. El contenido de materia seca (% MS) se estimó como el cociente entre peso seco:peso fresco y se expresó en porcentaje. El contenido de humedad se estimó como la diferencia 100 – (%MS). El material secado se molió hasta pasar una malla de 2 mm y se analizó el contenido

de potasio (% K). En una submuestra fresca se contó el número de tallos y se estimó el peso individual de los tallos (PIT), expresado en base seca. A partir del número de tallos de la submuestra se estimó el número de tallos m^{-2} ($\text{N}^{\circ}\text{T m}^{-2}$).

2.4.3. Evaluación de propiedades químicas del suelo

Para evaluar en el suelo los niveles finales de K intercambiable (K_{int}), P Bray I (P_{BrayI}), N total (N_{total}) y COS se realizó el muestreo en octubre del año 2013, en el sexto año de los cultivos. Se extrajeron muestras de suelo a la profundidad de 0 a 20 cm, 20 a 40 cm y 40 a 60 cm en todos los tratamientos. Las muestras fueron secadas a 40°C , molidas hasta pasar por malla 2 mm y enviadas al laboratorio para su análisis. La determinación de K_{int} se realizó mediante extracción con acetato de amonio y posterior determinación en espectrometría de llama por emisión atómica (Jackson, 1964); el contenido de P_{BrayI} se realizó acorde al extractante propuesto por Bray y Kurtz (1945) y el contenido de P en el extracto se determinó por desarrollo de color azul del complejo P-molibdato, acorde a (Murphy y Riley, 1962); el N total se determinó por digestión húmeda acorde a una modificación de la técnica de Kjeldahl propuesta por Bremner (1965); y COS se determinó mediante digestión húmeda acorde a Tynsley (1967).

2.4.4. Análisis estadístico

La producción de materia fresca y seca se analizó por modelos mixtos, con el software InfoStat/P (Di Rienzo *et al.*, 2012). Al haber medidas repetidas en el tiempo se consideraron a las parcelas como efecto aleatorio. Los niveles de COS, N_{total} , P Bray I, K_{int} , % K, se analizaron como modelo general lineal. Se consideraron efectos significativos del ANAVA aquellos con $p < 0,1$ y se consideró que existió tendencia en los efectos con $p < 0,2$. Todas las medias se compararon por test de Fisher con $\alpha = 0,10$. La estimación de producción de materia seca a partir de PIT y $\text{N}^{\circ}\text{T m}^{-2}$ se evaluó por el ajuste de la regresión obtenida.

El cálculo del beneficio económico por la fertilización con nitrógeno consideró la relación:
$$\frac{[(\text{U}\$ \text{ kg}^{-1} \text{ materia seca producida}) * \text{kg materia seca producida}]}{[(\text{U}\$ \text{ kg}^{-1} \text{ N invertido}) * \text{kg N invertido}]}$$
. Se consideró un valor de $0,1 \text{ U}\$ \text{ kg}^{-1}$ materia seca producida y un valor de $2,17 \text{ U}\$ \text{ kg}^{-1}$ N en la forma de urea, correspondientes a valores del año 2013.

2.5. Resultados y discusión

2.5.1. Producción de materia seca

La producción promedio de materia seca (Cuadro 1) fue mayor en el año 2013 (19,1 Mg ha⁻¹) que en el año 2012 (13,7 Mg ha⁻¹) debido, probablemente, a mejores condiciones climáticas. En el período de crecimiento 2012-2013 las lluvias se concentraron en diciembre 2012. En el período de crecimiento 2011-2012 las lluvias se concentraron en febrero 2012 (Figura 1). Esta diferencia de distribución de lluvias pudo aumentar la disponibilidad de agua durante el período de mayor sensibilidad al estrés hídrico del cultivo en el año 2013. Durante los meses de noviembre a enero ocurrieron las mayores radiaciones en ambos años y fueron mayores en el año 2012 respecto al año 2013 (datos no presentados). Estas diferencias no explicarían, por lo tanto, las diferencias de producción observadas entre años, ya que es esperable que mayor radiación provocara mayor producción, a igualdad de los factores restantes.

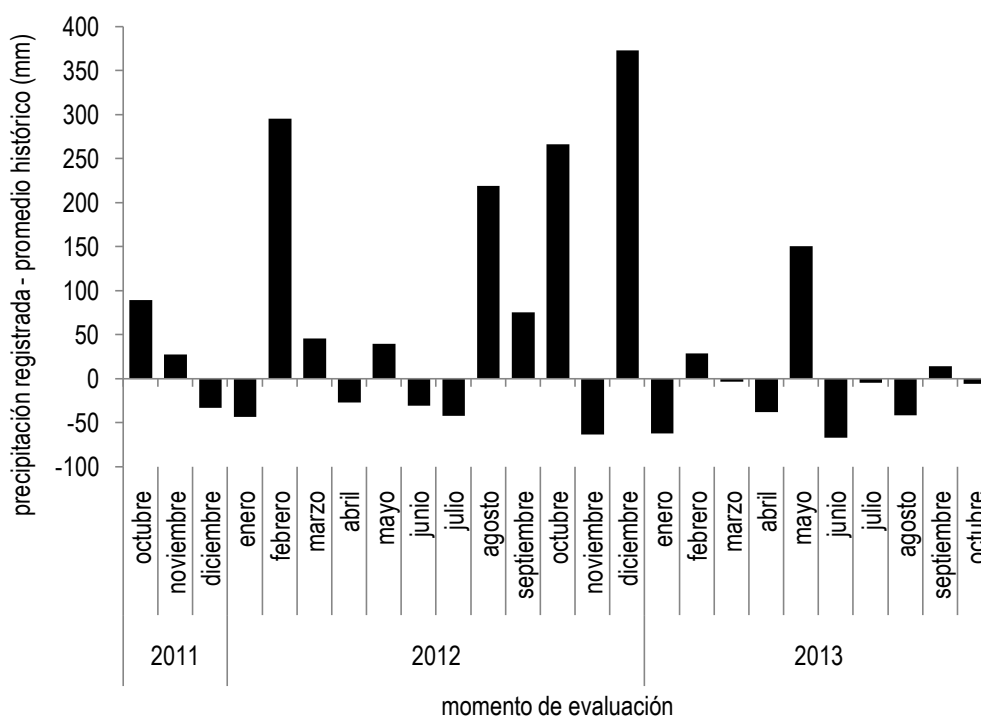


Figura 1. Diferencia de precipitación registrada durante la evaluación de este experimento y el promedio histórico.

Cuadro 1. Producción de materia seca por año y manejo de fertilización con nitrógeno para las tres especies.

Especie	2012			2013			Promedio
	0 N	100 N	Promedio anual	0 N	100 N	Promedio anual	
	Mg ha ⁻¹						
<i>A.donax</i>	10,69	18,94	14,82	19,66	25,45	22,56	18,60
<i>P.virgatum</i>	11,16	14,39	12,78	13,27	23,52	18,40	15,60
<i>P.purpureum</i>	10,98	16,03	13,51	13,00	19,62	16,31	14,90
Media			13.70			19.10	
Año†				*			
Nitrógeno				*			
Fósforo				Ns			
Especie				Ns			
Nitrógeno x Año				*			

† Representación parcial del Anava. N: kg ha⁻¹ nitrógeno.

A pesar que las tres especies tuvieron similares rendimientos de materia seca ($p=0,16$), *A. donax* tendió a un mayor rendimiento promedio y *P. purpureum* a la menor producción (Cuadro 1). Estos rendimientos estuvieron dentro de lo esperado para precipitaciones de 400 a 550 mm acorde a Falasca *et al.* (2011), quienes sugieren que en Argentina, *A. donax* puede tener rendimientos de 12,0 a 15,0 Mg ha⁻¹. En Italia Angelini *et al.* (2009, 2005) citan, para esta especie, rendimientos de 23,0 a 37,7 Mg ha⁻¹. En *P. virgatum* existe en la bibliografía gran diversidad de rendimientos, según localidades y cultivares, los que van desde 5,6 (Hall *et al.*, 1982) a 34,6 Mg ha⁻¹ (Sladden *et al.*, 1991), pero en promedio la bibliografía sitúa al rendimiento entre 8,0 y 10,0 Mg ha⁻¹ (Schmer *et al.* 2008, Heaton *et al.* 2004, Piscioneri y Pignatelli 2003, Lemus *et al.* 2002). Searle y Malins (2014) sugieren que los rendimientos de este cultivo son bajos (1,0 a 2,0 Mg ha⁻¹ año⁻¹) en suelos pobremente drenados y de inadecuada precipitación, los altos rendimientos (35,0 Mg ha⁻¹ año⁻¹) se asocian a climas cálidos, mientras los rendimientos intermedios (5,0 a 10,0 Mg ha⁻¹ año⁻¹) se asocian a zonas de clima templado. Al ser nuestro clima templado a sub tropical y los suelos tener un drenaje moderado a bien drenado, era esperable obtener valores intermedios de rendimiento. En la bibliografía el rendimiento de *P. purpureum* también es muy diverso, pero la producción de materia seca aquí obtenida se encuentra entre los registros más bajos citados. Cerdas y

Vallejos (2010) citan rendimientos de 5 a 16 Mg ha⁻¹ para períodos de producción de 30 a 60 días, mientras en Argentina, Petruzzi (2010) cita rendimientos de 5 a 12 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Olivo *et al.* (2013) obtuvieron, en un régimen de pastoreo, rendimientos de 23,4 a 34,3 Mg ha⁻¹ año⁻¹ acorde a que el cultivo haya sido manejado en forma orgánica (favoreciendo la instalación de especies espontáneas) o convencional, respectivamente. Alencar *et al.* (2013) en cultivos bajo riego, alcanzaron rendimientos de 28,2 a 35,6 Mg ha⁻¹ año⁻¹ con fertilización de 100 a 700 kg ha⁻¹ N. Fontoura *et al.* (2014) consideraron una variación de rendimiento de 20 a 40 Mg ha⁻¹ año⁻¹, al momento de evaluar la conveniencia de este cultivo para la producción de energía. Rodríguez *et al.* (2013), para cultivos en cuba, modelaron rendimientos entre 10 a 15 y 20 a 30 Mg ha⁻¹ año⁻¹, para estaciones secas o lluviosas respectivamente. Ra *et al.* (2012) observaron una producción de 53,2 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en *P.purpureum* y de 9,1 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en *P.virgatum*, lo que reflejó la menor adaptación ambiental de *P.virgatum* a esas condiciones de cultivo.

La fertilización con N aumentó, en promedio, 50 % la producción de materia seca en las tres especies (Cuadro 1). En *P.virgatum* la fertilización con N aumentó la producción de materia seca promedio anual en 67,3 kg ha⁻¹ kg⁻¹ N y en *P.purpureum* el aumento fue de 58,3 kg ha⁻¹ kg⁻¹ N. Acorde a la bibliografía era esperable que existiese respuesta a la fertilización. En *P.purpureum*, Ullah *et al.* (2010) obtuvieron respuesta a la fertilización con 80 kg ha⁻¹ N en cultivos en cortes frecuentes (cada 30 a 60 días) en suelos arenosos en Pakistán. Sharma *et al.* (2012) al fertilizar durante un período de dos años y un total de siete cortes, alcanzaron el mayor beneficio económico al agregar conjuntamente 80 kg ha⁻¹ N y 20 Mg ha⁻¹ de estiércol, en suelos arcillosos de escaso nivel de N. Sharma *et al.* (2012) reportaron respuestas del orden de 55 a 117 kg ha⁻¹ año⁻¹ kg⁻¹ N en cultivos de *P.purpureum* en India, las cuales son próximas a las obtenidas en este trabajo. Alencar *et al.* (2013), sin embargo, encontraron respuesta de tan solo 4,5 y 7,6 kg ha⁻¹ kg⁻¹ N acorde a la estación de crecimiento fuera otoño/invierno o primavera/verano respectivamente. Esta respuesta es próxima a la reportada por Ullah *et al.* (2010) quienes observaron incrementos de 10 kg ha⁻¹ kg⁻¹ N en un período máximo de 60 días de crecimiento. Las menores respuestas pudieron deberse al manejo de cosecha o pastoreo frecuente que manejaron los investigadores, acorde a lo discutido por Parrish y Fike (2005). En *P.virgatum*, Pedroso *et al.* (2014) obtuvieron una respuesta de 55 kg ha⁻¹ kg⁻¹ N en cultivos del valle central de California, resultado similar observaron Owens *et al.*

(2013) solamente en cultivo sobre suelos de bajo aporte de N. Haque *et al.* (2009) obtuvieron un incremento de hasta 100 kg ha⁻¹ kg⁻¹N en cultivos de Oklahoma. Allison *et al.* (2012), observaron incrementos de 50 % del rendimiento al fertilizar con 150 kg ha⁻¹ N cultivos de *P.virgatum* en el este de Inglaterra. Searle y Malins (2014) sugieren que para este cultivo es necesaria una fertilización anual con N no mayor a 56 kg ha⁻¹, la respuesta a la fertilización es diversa según la bibliografía consultada y no es consistente en que cantidades superiores a la citada alcancen un rendimiento satisfactorio. En *A.donax* el incremento de rendimiento de materia seca promedio anual fue de 69,8 kg ha⁻¹ kg⁻¹ N, pero esta respuesta no fue significativa. En la bibliografía se encuentran resultados dispares de la respuesta de esta especie a la fertilización. Angelini *et al.* (2005) aumentaron el rendimiento de 23 a 27 Mg ha⁻¹ año⁻¹ al fertilizar con 200, 80 y 200 kg ha⁻¹ de N, P y K respectivamente, cultivos de *A.donax* en la zona central de Italia. Palmer *et al.* (2014) no obtuvieron respuesta o fue negativa, al fertilizar un cultivo de *A.donax* con 134 kg ha⁻¹ N en la región de Carolina del Norte.

La respuesta a la fertilización con N fue mayor en el año 2013 (76 kg ha⁻¹ año⁻¹ kg⁻¹ N) que en el año 2012 (55 kg ha⁻¹ año⁻¹ kg⁻¹ N), debido probablemente al mayor crecimiento logrado en el año 2013. El beneficio económico de la fertilización (asumiendo los precios a diciembre de 2013) fue de un rango entre 2,7 a 3,2. No se observaron diferencias entre especies ya que las tres tuvieron similar respuesta al agregado de nitrógeno. Pese a los posibles cambios en los precios de los cultivos y de los fertilizantes, el beneficio obtenido otorgaría un amplio margen de variación de precios dentro de los cuales la fertilización sería rentable.

Ninguna de las tres especies aumentó el rendimiento debido a la fertilización con P, por lo que se puede asumir que el aporte de P del suelo fue suficiente. No existe en Uruguay información que especifique el nivel crítico de P disponible para estos cultivos. La falta de respuesta a la fertilización con P pudo deberse a la adaptación de estos cultivos a ambientes de bajo aporte de P. Xu *et al.* (2011) sugieren que en *A.donax* existen microorganismos solubilizadores de P en la rizósfera, lo cual podría explicar el crecimiento de este cultivo en suelos de bajos contenidos de P disponible. Gagne-Bourgue *et al.* (2013) reportaron bacterias capaces de solubilizar P en cultivos de *P.virgatum*. El exudado radicular por plantas de *P.purpureum* podría solubilizar P ligado al Fe y Al, lo cual le permitiría adaptarse a condiciones de baja disponibilidad de P (Shen *et al.*, 2001). Al igual que en las otras especies

aquí ensayadas, en *P.purpureum* se han identificado bacterias capaces de solubilizar P del suelo (Videira *et al.*, 2012).

El $N^{\circ}T\ m^{-2}$ y el PIT, resultaron ser adecuados indicadores del rendimiento de materia seca en las tres especies. En *A. donax* el PIT explicó el 52 % de la variación en producción de materia seca, mientras que el $N^{\circ}T\ m^{-2}$ no tuvo una relación significativa. Al estimar el rendimiento a partir de PIT y la interacción $N^{\circ}T\ m^{-2} \times PIT$, se pudo explicar el 96 % de la variación de rendimiento de materia seca. No hubo efecto de la fertilización en estos componentes. Angelini *et al.* (2009) observaron que la altura y diámetro del tallo, fueron las mayores componentes del rendimiento, lo cual se puede considerar un resultado similar al aquí obtenido, ya que el PIT dependería en parte del grosor del tallo, aunque esta relación no pudo cuantificarse en el presente trabajo. En *P. purpureum* a pesar que la relación entre el rendimiento y $N^{\circ}T\ m^{-2}$ fue baja ($R^2=0,25$), éste fue el componente más importante del rendimiento. Al considerar un efecto cuadrático de $N^{\circ}T\ m^{-2}$ se pudo explicar el 45 % de la variación de rendimiento, por lo que el rendimiento aumentó hasta cierto valor de $N^{\circ}T\ m^{-2}$ pero luego disminuyó. Este descenso pudo deberse a que un aumento de la densidad de tallos haya provocado una mayor competencia en su crecimiento, provocando la menor producción de biomasa a igual superficie. Aunque la fertilización con N aumentó el rendimiento no afectó estos componentes, por lo que es de suponer que pudo modificar la relación hoja:tallo o la altura de los tallos al momento de la cosecha. Oliveira *et al.* (2011) determinaron una relación satisfactoria entre rendimiento y altura de los tallos, aunque no fue una variable medida en el presente trabajo, es esperable que la altura sea influenciada por $N^{\circ}T\ m^{-2}$ debido a la competencia por luz que se genera al aumentar la densidad. En *P. virgatum* los componentes que definen el rendimiento de materia seca son tanto el PIT ($R^2=0,44$), así como el $N^{\circ}T\ m^{-2}$ ($R^2=0,39$), por lo que ambas variables serían de interés para aumentar el rendimiento. Al considerar ambas variables en un modelo de regresión pudo explicarse el 93 % de la variación de rendimiento. Boe y Beck (2008) observaron resultados similares para esta especie, ya que las variables de mayor relación con el rendimiento fueron $N^{\circ}T\ m^{-2}$ y peso del fitomero. El N aumentó el rendimiento de esta especie, aumentando ambos componentes de rendimiento. Se pudo estimar el rendimiento de las parcelas a través de las dos variables cuantificadas de una sub muestra de la cosecha, con una exactitud aceptable para *A.donax* y *P.virgatum*. Aunque con este experimento no puede llegarse a

información concluyente al respecto, sería posible suponer que estas variables, N°T m⁻² y/o PIT, serían indicadores de interés al evaluar el desempeño de los cultivares de las diferentes especies.

2.5.2. Contenido de humedad

La especie que tuvo el menor contenido de humedad a la cosecha fue *P. virgatum* (16 %), mientras *P. purpureum* tuvo el mayor contenido de humedad (52 %) y *A. donax* un valor intermedio (32 %). Al investigar estos cultivos con fines energéticos, McLaughlin *et al.* (1999) cuantificaron para *P. virgatum* un contenido de humedad de 15 % y Bulpitt (2009) para *A. donax* un contenido de 28 %. Smith y Slater (2011) obtuvieron valores de 14 a 30 % de humedad, dependiendo del año y zona de cosecha, en cultivos de Reino Unido. Dragoni *et al.* (2011), observaron valores superiores de humedad, de 61 a 48 %, al momento de cosecha de estos materiales. Los niveles de humedad reportados en la bibliografía para *P. purpureum*, son ligeramente superiores a los aquí observados, debido probablemente a que estos cultivos fueron manejados con cortes en estado vegetativo (Ukanwoko y Igwe, 2012) o cada 60 días (Zetina *et al.* 2013; Ribeiro *et al.*, 2014). Es deseable que estos cultivos posean bajos valores de contenidos de humedad, ya que esto disminuye los costos de transporte, almacenamiento y del secado previo a su utilización como materia prima.

El contenido de humedad promedio de las tres especies fue menor en el año 2013. Es posible, también, que las mayores lluvias de agosto de 2012 hayan aumentado la humedad de los tejidos cosechados. Smith y Slater (2011) sugieren este efecto de re humedecimiento al explicar el alto contenido de humedad en un cultivo de *Mischantus* en el mes de enero de 2007, coincidentes con altas precipitaciones para ese mes, en Reino Unido. No hubo efecto de la fertilización con N, ni con P, en el contenido de humedad en ninguna de las tres especies. Allison *et al.* (2012), sin embargo, cuantificaron aumentos en los contenidos de fibra en detergente neutro y lignina en cultivos de *P. virgatum* fertilizados con N, lo que provocaría mayor contenido de materia seca. Flores *et al.* (2012) no encontraron efecto de la fertilización con nitrógeno en los contenidos de fibra de cultivos de *P. purpureum*.

2.5.3. Carbono en el suelo

Al sexto año de los cultivos no hubo diferencias en los contenidos de carbono del suelo entre especies ni manejos de fertilización, en las profundidades evaluadas. A la profundidad de 20 a 40 cm, sin embargo, la especie *P.virgatum* presentó mayor contenido de COS que *P.purpureum*, en las parcelas sin fertilizar con N ni P (Cuadro 2). Para la profundidad de 0 a 20 cm el contenido promedio de COS en suelo, de todo el ensayo, fue de 18,6 g kg⁻¹, en la profundidad de 20 a 40 cm el contenido fue de 10,8 g. kg⁻¹ y para la profundidad de 40 a 60 cm fue de 7,5 g kg⁻¹. Ji *et al.* (2011), Lee *et al.* (2007) analizaron aumentos del carbono en el suelo al fertilizar *P.virgatum* durante cinco años. Jung y Lal (2011) registraron aumentos en el COS en dos de tres sitios ensayados en Ohio, tras dos años de evaluación. El contenido de COS en suelo hasta un metro de profundidad, fue mayor bajo cultivo de *P.virgatum* que en praderas de gramíneas perennes, pero no difirió en los primeros 15 cm (Omonode y Vyn, 2006). Dou *et al.* (2013), Lobo y Porfirio (2004) concluyen que *P.virgatum* puede favorecer el aumento de COS al determinar mayores valores que en cultivos convencionales. Garten *et al.* (2011) sugieren que el efecto de la fertilización de *P.virgatum* con N, en el COS, dependerá de los mecanismos de protección de la descomposición de la materia orgánica del suelo, ya que la fertilización disminuyó la relación C:N y la producción de raíces de los cultivos. Schmer *et al.* (2011) al cabo de 10 años de cultivos de *P.virgatum*, en Nebraska, encontraron incrementos de 0,5 Mg año⁻¹ de COS en los primeros 30 cm de suelo. En Texas, el cultivo de *A.donax* presentó, al cabo de 40 años, mayor contenido de COS hasta los 50 cm de profundidad que los cultivos de *Cynodum dactylum* (Sarkhot *et al.*, 2012). No es posible, en este ensayo, estimar el aporte individual de cada cultivo al COS del suelo y la falta de diferencias entre ellos solo es causa de su similar comportamiento.

Cuadro 2. Contenido de COS (g kg⁻¹) en el suelo, por profundidad de muestreo, especie y manejo de fertilización.

Fertilización†	<i>P.purpureum</i>	<i>P. virgatum</i>	<i>A.donax</i>	DMS (p≤0,10) ‡
0 - 20 (cm)				
0 N 0 P	18,1	19,0	19,0	ns
0 N 100 P	19,5	18,9	16,6	ns
100 N 0 P	19,2	19,6	17,6	ns
100 N 100 P	19,7	18,1	18,6	ns
Media	19,1	18,9	18,0	ns
20 - 40 (cm)				
0 N 0 P	9,6	11,4	10,3	0,13
0 N 100 P	11,4	10,3	8,7	ns
100 N 0 P	10,6	11,7	12,1	ns
100 N 100 P	12,7	11,1	9,8	ns
Media	11,1	11,1	10,2	ns
40 - 60 (cm)				
0 N 0 P	7,5	8,6	8,2	ns
0 N 100 P	6,5	6,2	7,4	ns
100 N 0 P	7,8	6,8	8,3	ns
100 N 100 P	6,9	7,7	8,0	ns
Media	7,2	7,3	8,0	ns

†. Fertilización: 0N, sin agregado de N; 100 N, agregado de 100 kg ha⁻¹ N; 0 P, sin agregado de P; 100 P, agregado de 100 kg ha⁻¹ P₂O₅. ‡. DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

2.5.4. Fósforo en el suelo

Hubo un claro efecto de aumento del P_Brayl al fertilizar con P, en la profundidad de 0 a 20 cm. *Panicum virgatum* fue la especie en la cual se midió mayor nivel de P_Brayl, a la profundidad de 0 a 20 cm en el tratamiento con fertilización con P. *A. donax* y *P.purpureum* presentaron similares niveles (Cuadro 3). El mayor valor analizado en el cultivo de *P.virgatum* pudo deberse a la menor extracción de P realizada, debido al menor rendimiento. Es de esperarse además que este cultivo haya realizado mayor reciclado del P absorbido al senescer y depositarse las hojas en la superficie del suelo. Schmer *et al.* (2011), sin embargo, observaron disminuciones de la disponibilidad de P luego de 10 años de cultivos de *P.virgatum*. La fertilización con N no provocó cambios en los niveles de P_Brayl, pese a haber provocado diferencias de rendimiento. Es posible que la mayor cantidad de biomasa removida no provocase mayor extracción de P si la concentración de P en la biomasa fuera menor a mayor cantidad de ésta.

En las otras dos profundidades de muestreo no se observaron diferencias en concentración entre especies, ni por causa de la fertilización con P ni N (Cuadro 3). Es posible que la diferencia observada a menor profundidad se deba a la estratificación provocada por la absorción de P por la planta y la deposición del mismo en superficie a través de la senescencia de tejido. La ausencia de laboreo, dado que son cultivos perennes, no favorecería la reincorporación de este elemento en profundidad.

Cuadro 3. Contenido de P_Brayl (mg kg⁻¹) en suelo, por profundidad de muestreo, especie y manejo de fertilización.

Fertilización†	<i>P.purpureum</i>	<i>P. virgatum</i>	<i>A.donax</i>	DMS (p≤0,10) ‡
0 - 20 (cm)				
0 N 0 P	4,4	4,7	4,9	ns
0 N 100 P	19,5	33,1	21,3	ns
100 N 0 P	4,1	3,9	4,8	ns
100 N 100 P	12,7	34,1	16,1	8,4
Media	10,2	18,9	11,8	ns
20 - 40 (cm)				
0 N 0 P	2,3	2,7	2,4	ns
0 N 100 P	3,2	2,7	2,4	ns
100 N 0 P	2,7	3,3	2,4	ns
100 N 100 P	2,9	2,7	3,3	0,5
Media	2,8	2,8	2,6	ns
40 - 60 (cm)				
0 N 0 P	2,9	2,2	3,2	ns
0 N 100 P	2,7	2,6	2,9	ns
100 N 0 P	2,7	2,7	4,4	1,15
100 N 100 P	2,0	2,4	2,0	ns
Media	2,6	2,5	3,1	ns

†. Fertilización: 0N, sin agregado de N; 100 N, agregado de 100 kg ha⁻¹ N; 0 P, sin agregado de P; 100 P, agregado de 100 kg ha⁻¹ P₂O₅. ‡. DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

2.5.5. Potasio en el suelo

Las parcelas cultivadas con *A.donax* fueron las que tuvieron mayor K_{int} al final del período de evaluación 0,63 meq.100g⁻¹, de 0 a 20 cm de profundidad. *Pennisetum purpureum* y *P.virgatum* presentaron similares valores de K_{int}, 0,40 y 0,42 meq.100g⁻¹ respectivamente. Las diferencias entre estas especies pudieron deberse a las diferencias de composición de la biomasa extraída.

Las parcelas fertilizadas con N presentaron menores niveles de K_{int}, a la profundidad de 0 a 20 cm, que las parcelas sin fertilizar (Cuadro 4). No hubo efecto de la fertilización con P. Es posible que el mayor rendimiento de las parcelas fertilizadas con N haya provocado mayor extracción y el K_{int} haya disminuido. Este efecto de la fertilización fue significativo en las dos especies donde se observó respuesta a la fertilización con N, *P.virgatum* y *P.purpureum*. En *A.donax* no hubo respuesta en rendimiento a la fertilización con N y el K_{int} tampoco fue diferente entre parcelas testigo o fertilizadas.

Cuadro 4. Contenido de K intercambiable (meq.100g⁻¹) en el suelo para cada especie, según nivel de fertilización con N y P, por profundidad de muestreo.

Fertilización†	<i>P.purpureum</i>	<i>P. virgatum</i>	<i>A.donax</i>	DMS (p≤0,10) ‡
0 - 20 (cm)				
0 N 0 P	0,45	0,51	0,69	0,12
0 N 100 P	0,46	0,44	0,57	ns
100 N 0 P	0,33	0,41	0,68	0,19
100 N 100 P	0,39	0,34	0,60	0,15
Media	0,40	0,42	0,63	0,06
20 - 40 (cm)				
0 N 0 P	0,43	0,39	0,37	ns
0 N 100 P	0,42	0,39	0,43	ns
100 N 0 P	0,31	0,38	0,35	ns
100 N 100 P	0,42	0,33	0,31	ns
Media	0,40	0,37	0,37	ns
40 - 60 (cm)				
0 N 0 P	0,49	0,35	0,47	0,13
0 N 100 P	0,68	0,79	0,40	ns
100 N 0 P	0,52	0,70	0,93	ns
100 N 100 P	0,43	0,72	0,74	ns
Media	0,53	0,64	0,64	ns

†. Fertilización: 0N, sin agregado de N; 100 N, agregado de 100 kg ha⁻¹ N; 0 P, sin agregado de P; 100 P, agregado de 100 kg ha⁻¹ P₂O₅. ‡. DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

Al igual que en P_Brayl, en las profundidades mayores a 20 cm no se observaron diferencias en K_{int} entre especies ni a causa de la fertilización (Cuadro 4). Las razones de este comportamiento serían explicadas por la misma razón que lo observado en P. En los tratamientos sin fertilización, sin embargo, el suelo cultivado con *P.virgatum* tuvo menores contenidos de K que *P.purpureum* a la profundidad de 40 a 60 cm. Esto podría deberse a una mayor extracción de K por *P.virgatum* a esta profundidad.

2.5.6. Potasio en la biomasa

La especie *P.purpureum* fue la que tuvo la mayor concentración de K, 1,45 %, *A.donax* presentó un contenido intermedio de 0,35 % K y *P.virgatum* tuvo el menor contenido de K, 0,1 % (Cuadro 5). *Pennisetum purpureum* tuvo altos contenidos de humedad al momento de la cosecha, pudiéndose suponer que el proceso de translocación de los minerales no ocurriese de forma eficiente en esta especie. Los menores contenidos de K en *P.virgatum* podrían atribuirse a lo mencionado por McLaughlin *et al.* (1999), quienes observaron que en esta especie, la alta relación de tallo:hoja puede favorecer los bajos valores de K en la biomasa, pero esta relación no se cuantificó en este experimento.

La mayor extracción de K la presentó *P.purpureum*, 216 kg ha⁻¹ año⁻¹ y la menor extracción la presentó *P.virgatum*, 16 kg ha⁻¹ año⁻¹. A pesar de la alta extracción de *P.purpureum*, esto no se reflejó en menores valores de K_{int} en el suelo, que en los cultivos de *P.virgatum*. Es posible que el reciclaje de biomasa senescente sea importante en *P.purpureum* y contribuya en mantener los contenidos de K en el suelo a la profundidad muestreada. *Arundo donax* extrajo 65 kg ha⁻¹ año⁻¹ y fue la especie que presentó mayor contenido de K_{int} en suelo, lo que podría atribuirse al mayor reciclado que generaría este cultivo, al depositar sobre la superficie parte del K absorbido, a través de la senescencia de las hojas.

La concentración de K en la biomasa, de *P.purpureum*, cosechada en el 2013 fue mayor a la del año 2012 (Cuadro 5). Es posible que las menores precipitaciones desde enero a marzo del año 2013 provocasen esta mayor concentración de K, al presentar mayor estrés hídrico el cultivo durante el período de translocación. Nassi o Di Nasso *et al.* (2010), observaron un incremento de K en la biomasa de *A.donax* debido al estrés hídrico. Este estrés también se vio reflejado en el menor contenido de humedad de los tejidos en el año 2013. Es posible que la formación de heladas haya ocurrido en la segunda semana de abril del año 2013, mientras que en el año 2012 éstas ocurriesen en la cuarta semana, lo cual se presupone por las temperaturas mínimas próximas a 5 °C medidas en casilla meteorológica. Las heladas interrumpirían el proceso de translocación de K desde la parte aérea a los órganos de reserva de estas especies, por lo cual la biomasa cosechada en el 2013 tendría mayor contenido de K.

Cuadro 5. Contenido de K (%) en la biomasa para cada especie, por año de cosecha.

Fertilización†	<i>P.purpureum</i>	<i>P. virgatum</i>	<i>A.donax</i>	DMS ($p \leq 0,10$) ‡
2012				
0 N 0 P	1,12	0,10	0,43	0,16
0 N 100 P	1,30	0,15	0,36	0,21
100 N 0 P	1,24	0,09	0,38	0,31
100 N 100 P	1,17	0,08	0,31	0,39
Media	1,21	0,11	0,37	0,11
2013				
0 N 0 P	1,93	0,05	0,28	0,46
0 N 100 P	1,65	0,12	0,29	0,24
100 N 0 P	1,73	0,08	0,37	0,18
100 N 100 P	1,50	0,15	0,39	0,34
Media	1,70	0,10	0,33	0,12

†. Fertilización: 0N, sin agregado de N; 100 N, agregado de 100 kg ha⁻¹ N; 0 P, sin agregado de P; 100 P, agregado de 100 kg ha⁻¹ P₂O₅. ‡. DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

2.5.7. Nitrógeno en el suelo

El contenido de N_{total} en los primero 20 cm de profundidad de muestreo, fue mayor en el suelo cultivado con *P.purpureum* que en las otras dos especies (Cuadro 6). Esta diferencia se debió fundamentalmente a la fertilización con N en *P.purpureum*, ya que fue el único tratamiento que se diferencio del resto. Es posible que *P.purpureum* haya extraído menor cantidad de N al ser la especie de menor rendimiento o que posea menor concentración de N en la cosecha. El *P.purpureum* pudo tener una menor translocación de N a los órganos de reserva al momento de la senescencia de sus tejidos, a causa de las heladas y al caer las hojas podrían tener mayor contenido de N que en las otras especies. Lobo y Porfirio (2004) observó mayor acumulación de N orgánico en los primero 5 cm de suelo cultivado con *P.virgatum* que en suelos cultivados con especies agrícolas anuales, en tres de los cuatro sitios evaluados.

A la profundidad de 20 a 40 cm el contenido de N total fue mayor en las parcelas fertilizadas con N. En las parcelas sin fertilización con P ni N, cultivadas con la especie *P.purpureum*, fueron las de menor contenido. A la profundidad de 40 a 60 cm la especie *A.donax* sin fertilización con N ni P, fue la que presentó menor contenido de N total en el suelo. Estos resultados se deberían a diferencias en el crecimiento radicular entre las especies. No se abordaron en este estudio indicadores que permitan concluir sobre este tema.

Cuadro 6. Contenido de N total (%) en suelo para cada especie, fertilización con N y P, por profundidad de muestreo.

Fertilización†	<i>P.purpureum</i>	<i>P. virgatum</i>	<i>A.donax</i>	DMS ($p \leq 0,10$) ‡
0 - 20 (cm)				
0 N 0 P	0,168	0,167	0,185	ns
0 N 100 P	0,171	0,172	0,159	ns
100 N 0 P	0,185	0,169	0,160	ns
100 N 100 P	0,200	0,161	0,167	0,028
Media	0,181	0,167	0,168	0,013
20 - 40 (cm)				
0 N 0 P	0,089	0,113	0,112	0,021
0 N 100 P	0,105	0,103	0,096	ns
100 N 0 P	0,108	0,110	0,117	ns
100 N 100 P	0,118	0,107	0,119	ns
Media	0,105	0,108	0,111	ns
40 - 60 (cm)				
0 N 0 P	0,082	0,086	0,077	0,006
0 N 100 P	0,085	0,075	0,079	ns
100 N 0 P	0,081	0,079	0,093	ns
100 N 100 P	0,083	0,085	0,092	ns
Media	0,083	0,081	0,085	ns

†. Fertilización: 0N, sin agregado de N; 100 N, agregado de 100 kg ha⁻¹ N; 0 P, sin agregado de P; 100 P, agregado de 100 kg ha⁻¹ P₂O₅. ‡. DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

2.6. Conclusiones

Los rendimientos observados en las tres especies fueron los esperables para nuestra región, lo cual revelaría una adecuada adaptación específica a la zona. La producción de biomasa tuvo variabilidad anual atribuible a las condiciones climáticas, se observó, sin embargo, una tendencia a mayor producción de *A.donax*. La fertilización con N aumentó el rendimiento de las tres especies y la eficiencia de utilización del N aplicado estaría dentro de lo esperable. Es necesario futuras investigaciones para determinar la dosis óptima de N, ya que éste es considerado el insumo de mayor costo. No hubo respuesta a la fertilización con P, por lo que se puede considerar que el aporte del suelo fue suficiente. El aumento de P_{Brayl} en la superficie del suelo se debería a que la extracción de los cultivos y la fijación del suelo, fueron menores al aporte de P por fertilización. Pese a los rendimientos intermedios de *P.virgatum*, esta especie fue la que presentó menor contenido de humedad, lo que es una característica favorable como materia prima para la producción de energía. Pese a ser cultivos perennes de alta producción de biomasa, esta mayor producción no contribuyó a mayores contenidos de

COS . Existieron diferencias significativas en la extracción de K y no hubo una clara relación con los valores de K_{int} , por lo que es necesario profundizar en la dinámica de su absorción y deposición en la superficie del suelo a través de la senescencia de los tejidos.

2.7. Bibliografía

- Alencar CAB, Cunha FF, Martins CE, Cóser AC, Oliveira RA, Araújo RAS. 2013. Adubação nitrogenada e estações anuais na produção de capins irrigados no este mineiro sob corte. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal* 14(3): 413-425.
- Allison GG, Morris C, Lister SJ, Barraclough T, Yates N, Shield I, Donnison IS. 2012. Effect of nitrogen fertiliser application on cell wall composition in switchgrass and reed canary grass. *Biomass and Bioenergy*. 40: 19-26.
- Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echevarría A, Panario D, Puentes R. 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay: Tomo III Apéndice- parte 2: Descripciones, datos físicos y químicos de los suelos dominantes. Montevideo: Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes.
- Angelini LG, Ceccarini L, Bonari E. 2005. Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundo donax* L.) cropped in central Italy as related to different management practices. *European Journal of Agronomy*. 22: 375–389.
- Angelini LG, Ceccarini L, Nassi o Di Nasso N, Bonari E. 2009. Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus x giganteus* in a long-term field experiment in Central Italy: Analysis of productive characteristics and energy balance. *Biomass and Bioenergy*. 33: 635–643.
- Boe A, Beck DL. 2008. Yield Components of Biomass in Switchgrass. *Crop Science*. 48(4): 1306-1311.
- Boehmel C, Lewandowski I, Claupein W. 2008. Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. 96: 224-236.
- Bray, R.H.; Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, Baltimore, 59: 39-45
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. *In*: Black, C.A., [ed]. *Methods of Soil Analysis*. Agronomy N° 9, part 2. 1149-1178

- Bulpitt WS. 2009. Fuel properties and combustion Theory. En: McGowan TF. (Ed.). Biomass and Alternate Fuel Systems: An Engineering and Economic Guide. New Jersey. Wiley. 13-35.
- Cerdas R, Vallejos E. 2010. Productividad del pasto Camerún (*Pennisetum purpureum*) con varias dosis de nitrógeno y frecuencias de corte en la zona seca de Costa Rica. InterSedes. XI (22): 180-195.
- Di Rienzo JA, Cassanoves F, Balzrini MG, González L, Cuadroda M, Robledo CW. 2012. InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Dou FG, Hons FM, Ocumpaugh WR, Read JC, Hussey MA, Muir JP. 2013. Soil Organic Carbon Pools Under Switchgrass Grown as a Bioenergy Crop Compared to other Conventional Crops. Pedosphere 23(4): 409–416.
- Dragoni FF, Ragaglini GG, Nassi o Di Nasso NN, Tozzini CC, Bonari EE. 2011. Suitability of giant reed and miscanthus for biogas: preliminary investigations on harvest time and ensiling. Aspects of Applied Biology. 112: 291-296.
- Falasca S, Flores MN, Galvani G. 2011. ¿Puede usarse una especie invasora como *Arundo donax* (caña común) con fines energéticos en Argentina?. [En línea]. Citado el 5 de mayo 2014. Disponible en: <http://ebookbrowse.net/file-name-inta-arundo-donax-con-fines-energeticos-en-argentina-pdf-d314127398>.
- Flores RA, Urquiaga S, Alves JR, Collier LS, Boddey RM. 2012. Yield and quality of elephant grass biomass produced in the cerrados region for bioenergy. Engenharia Agrícola. 32(5): 831-839.
- Fontoura CF, Brandão LE, Lima Gomes L. 2014. Elephant grass biorefineries: towards a cleaner Brazilian energy matrix?. *Journal of Cleaner Production*. Article in Press.
- Gagne-Bourgue FF, Aliferis KA, Seguin PP, Rani MM, Samson RR, Jabaji SS. 2013. Isolation and characterization of indigenous endophytic bacteria associated with leaves of

- switchgrass (*Panicum virgatum* L.) cultivars. *Journal of Applied Microbiology*. 114(3): 836-853.
- Garten JCT, Brice DJ, Castro HF, Graham RL, Mayes MA, Phillips JR, Post WM, Schadt, CW, Wulschleger SD, Tyler DD, Jardine, PM, Jastrow JD, Matamala R, Miller RM, Moran KK, Vugteveen TW, Izaurralde RC, Thomson AM, West TO, Amonette JE, Bailey VL, Metting FB, Smith JL. 2011. Response of "Alamo" switchgrass tissue chemistry and biomass to nitrogen fertilization in West Tennessee, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 140 (1-2): 289-297.
- Hall KE, George JR, Riedl RR. 1982. Herbage Dry Matter Yields of Switchgrass, Big Bluestem, and Indiangrass with N Fertilization. *Agronomy Journal*. 74(1): 47-51.
- Haque M, Epplin FM, Taliaferro CM. 2009. Nitrogen and Harvest Frequency Effect on Yield and Cost for Four Perennial Grasses. *Agronomy Journal*. 101:1463–1469.
- Heaton E, Voigt T, Long SP. 2004. A quantitative review comparing the yields of two candidate C4 perennial biomass crops in relation to nitrogen, temperature and water. *Biomass and Bioenergy*. 27(1) 21:30.
- Jackson, M.L. 1964. Análisis químico de suelos. Ediciones Omega S.A. Barcelona. 662 p
- Jenkins BM., Baxter LL, Miles Jr TR, Miles TR. 1998. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*. 54: 17– 46
- Ji J, Lal R, Jastrow JD, Tyler DD. 2011. Nitrogenous fertilizer effects on soil structural properties under switchgrass. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 141(1/2): 215-220.
- Jung JY, Lal R. 2011. Impacts of nitrogen fertilization on biomass production of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) and changes in soil organic carbon in Ohio. *Geoderma*. 166(1): 145-152.
- Lee DK, Owens VN, Doolittle JJ. 2007. Switchgrass and Soil Carbon Sequestration Response to Ammonium Nitrate, Manure, and Harvest Frequency on Conservation Reserve Program Land. *American Society of Agronomy*. 99:462-468.

- Lemus R, Brummer EC, Moore KJ, Molstad NE, Burras CL, Barker MF. 2002. Biomass yield and quality of 20 switchgrass populations in southern Iowa, USA. *Biomass and Bioenergy*. 23: 433 – 442.
- Lobo A, Porfirio J. 2004. Changes in soil carbon and nitrogen associated with switchgrass production. Master's thesis, Texas A&M University. Texas A&M University. [En línea]. Citado el 24 de junio 2014. Disponible en: <http://repository.tamu.edu/handle/1969.1/1258>.
- McLaughlin S, Bouton J, Bransby D, Conger B, Ocumpaugh W, Parrish D, Taliaferro C, Vogel K, Wullschlegel S. 1999. Developing switchgrass as a bioenergy crop. p. *En: Janick J [Ed]. Perspectives on new crops and new uses*. ASHS Press, Alexandria, VA. pp. 282–299.
- Murphy, J.; Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, Washington, 27: 31-36
- Nassi o Di Nasso N, Angelini LG, Bonari E. 2010. Influence of fertilisation and harvest time on fuel quality of giant reed (*Arundo donax* L.) in central Italy. *European Journal of Agronomy*. 32(3):219-227.
- Oliveira T, Pereira JC, Reis C, Queiroz A, Cecon P, Gomes S. 2011. Composição químico-bromatológica do capim-elefante submetido à adubação química e orgânica. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, Salvador. 12(1):32-42.
- Olivo CJ, Flores Aguirre P, da Ros de Araújo TL, Schalemborg Diehl M, Marques de Bem C, Serafim G, da Rosa Correa M. 2013. Produtividade e proteína bruta de pastagens de capim elefante manejadas sob os sistemas agroecológico e convencional. *Ciência Rural*, Santa Maria. 43(8): 1471-1477.
- Omonode RA, Vyn TJ. 2006. Vertical distribution of soil organic carbon and nitrogen under warm-season native grasses relative to croplands in west-central Indiana, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 117(2/3): 159-170.

- Owens VN, Viands DR, Mayton HS, Fike JH, Farris R, Heaton E, Bransby DI, Hong, CO. 2013. Nitrogen use in switchgrass grown for bioenergy across the USA. *Biomass and Bioenergy*. 58: 286-293.
- Palmer IE, Gehl RJ, Ranney TG, Touchell D, George, N. 2014. Biomass yield, nitrogen response, and nutrient uptake of perennial bioenergy grasses in North Carolina. *Biomass and Bioenergy*. 63: 218-228.
- Parrish DJ, Fike JH. 2005. The Biology and Agronomy of Switchgrass for Biofuels. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 24(5/6): 423-459.
- Pedroso GM, Hutmacher RB, Putnam D, Six J, van Kessel C, Linquist BA. 2014. Biomass yield and nitrogen use of potential C4 and C3 dedicated energy crops in a Mediterranean climate. *Field Crops Research*. 161: 149-157.
- Petruzzi H. 2010. Pasto varilla –cultivo bio-energético. [En línea]. Citado el 24 de junio de 2014. Disponible en: http://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/37-Residuos_cultivos.pdf.
- Piscioneri I, Pignatelli V. 2003. An evaluation of biomass yield stability of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) cultivars. *Energy Conversion and Management*. 44(18): 2953–2958.
- Ra K, Shiotsu F, Abe J, Morita S. 2012. Biomass yield and nitrogen use efficiency of cellulosic energy crops for ethanol production. *Biomass and Bioenergy*. 37: 330 – 334.
- Ribeiro LSO; Pires AJV; de Carvalho GGP; Pereira MLA; dos Santos AB; Rocha LC. 2014. Fermentation characteristics, chemical composition and fractionation of carbohydrates and crude protein of silage of elephant grass wilted or with addition of castor bean meal. *Ciências Agrárias, Londrina*. 35(3): 1447 – 1462.
- Rodríguez L, Larduet R, Ramos N, Martínez RO. 2013. Modelling of dry matter yield of *Pennisetum purpureum* cv. king grass with different cutting frequencies and N fertilizer dosages. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 47(3): 227 – 232.

- Sarkhot DV, Grunwald S, Morgan CLS, Geb Y. 2012. Total and available soil carbon fractions under the perennial grass *Cynodon dactylon* (L.) Pers and the bioenergy crop *Arundo donax* L. *Biomass and Bioenergy*. 41: 122–130.
- Schmer MR, Liebig MA, Vogel KP, Mitchell RB. 2011. Field-scale soil property changes under switchgrass managed for bioenergy. *GCB Bioenergy*. 3(6): 439-448.
- Schmer MR, Vogel KP, Mitchell RB, Perrin RK. 2008. Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 105(2): 464-469.
- Searle SY, Malins CJ. 2014. Will energy crop yields meet expectations?. *Biomass and Bioenergy*. *In press*.
- Sharma AK, Bharat R, Rai PK, Sharma R. 2012. Farmyard Manure and Nitrogen Application at Different Planting Dates on Napier (*Pennisetum purpureum* Shum.). *Environment & Ecology*. 30(3C): 1185 – 1191.
- Shen H, Wang X, Shi W, Cao Z, Yan X. 2001. Isolation and identification of specific root exudates in elephantgrass in response to mobilization of iron- and aluminum-phosphates. *Journal of Plant Nutrition*. 24(7): 1117 – 1130.
- Sladden SE, Bransby DI, Aiken GE. 1991. Biomass yield, composition and production costs for eight switchgrass varieties in Alabama. *Biomass and Bioenergy*. 1(2): 119–122.
- Smith RR, Slater FM. 2011. Mobilization of minerals and moisture loss during senescence of the energy crops *Miscanthus×giganteus*, *Arundo donax* and *Phalaris arundinacea* in Wales, UK. *GCB Bioenerg*. 3(2): 148-157.
- Tynsley, J. 1967. *Soil Science. Manual of experiments*. University of Aberdeen. Department of Soil Science. 124 p
- Ukanwoko AI, Igwe NC. 2012. Proximate Composition of Some Grass and Legume Silages Prepared in a Humid Tropical Environment. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*. 2(2): 068 – 071.

- Ullah MA, Anwar M, Rana AS. 2010. Effect of nitrogen fertilization and harvesting intervals on the yield and forage quality of elephant grass (*Pennisetum purpureum*) under mesic climate of pothowar plateau. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 47(3): 231-234.
- Videira SS, Oliveira D, Morais R, Borges WL, Baldani VD, Baldani JI. 2012. Genetic diversity and plant growth promoting traits of diazotrophic bacteria isolated from two *Pennisetum purpureum* Schum. genotypes grown in the field. *Plant and Soil*. 356(1/2): 51-66.
- Xu JJ, Kloepper JW, McInroy JJ, Hu CH, Bonilla RR. 2011. Isolation and characterization of nitrogen-fixing and phosphate-solubilizing bacteria from *Arundo donax* L. (giant reed). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) for Sustainable Agriculture. Proceedings off The 2nd Asian PGPR Conference, Beijing, China, 21-24 August, 2011, 409-415.
- Zetina-Cordoba P, Ortega-Cerrilla ME, Ortega-Jimenez E, Herrera-Haro JG, Sanchez-Torres-Esqueda MT, Reta-Mendiola JL, Vilaboa-Arroniz J, Munguia-Ameca G. 2013. Effect of cutting interval of Taiwan grass (*Pennisetum purpureum*) and partial substitution with duckweed (*Lemna* sp. and *Spirodela* sp.) on intake, digestibility and ruminal fermentation of Pelibuey lambs. *Livestock Science*.157: 471 – 477.

3. Producción de biomasa de cultivos lignocelulósicos según el número de cortes

Crop Lignocellulosic Biomass Production by Number of Cuts

3.1. Resumen

En Uruguay se plantea diversificar la matriz energética a través de la producción de biomasa. Las especies *Arundo donax*, *Panicum virgatum* y *Pennisetum purpureum*, serían una opción viable. Los objetivos fueron comparar su producción de biomasa y energía, con diferentes manejos de cortes. Los cultivos se instalaron en la primavera del 2007 y se evaluaron desde enero de 2012 hasta agosto de 2013. Se realizaron dos tratamientos de cosecha: corte en enero y agosto; y un solo corte en agosto. *Arundo donax* produjo 18,6 Mg ha⁻¹ año⁻¹, más que *P.virgatum* y *P.purpureum*, que produjeron respectivamente 15,0 y 14,6 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de materia seca. En *A.donax* y *P.virgatum* un solo corte produjo más y al realizar dos cortes la mayor producción fue en enero. En *P.purpureum* la diferencia entre tratamientos de cortes fue significativa en el año 2012 y el corte de agosto produjo más que el de enero. *Arundo donax* y *P.purpureum* presentaron mayores contenidos de cenizas y los valores de agosto fueron menores a enero, en *P.virgatum* no hubo diferencias entre cosechas. La mayor producción de energía se logró con *A.donax* (407 GJ ha⁻¹ año⁻¹) al cosecharlo una sola vez. *Panicum virgatum* fue el cultivo de menor producción de energía con un solo corte (292 GJ ha⁻¹ año⁻¹), pero tuvo el menor contenido de humedad (15 %) y cenizas (4,9 %), lo cual reduciría los costos en la producción de energía. Con una sola cosecha, en agosto, se lograría un material con menor contenido de cenizas y humedad, en las tres especies.

Palabras clave: *Arundo donax*, cosecha, cultivos energéticos, *Panicum virgatum*, *Pennisetum purpureum*

3.2. Summary

In Uruguay the diversification of the energy matrix through biomass production is being evaluated. The species *Arundo donax*, *Panicum virgatum* and *Pennisetum purpureum*, would be a viable option. The objectives were to compare the production of biomass and energy, with different management cuts. The cultures were installed in the spring of 2007 and were evaluated from January 2012 to August 2013. Two harvest treatments were performed: cuts in January and August; and only one cut in August. *Arundo donax* produced 18.6 Mg ha⁻¹.y⁻¹, more than, *P.virgatum*, *P.purpureum* which produced 15.0 and 14.6 Mg ha⁻¹.y⁻¹ of dry matter respectively. In *P.virgatum* and *A.donax* one cut produced more and with two cuts the greater production was in January. In *P.purpureum* the difference between cuts treatments was significant in 2012 and the August cut produced more than the one in January. *Pennisetum purpureum* and *A.donax* had higher ash contents and values were lower in August than in January, in *P.virgatum* there were no differences between harvests. Higher energy production was achieved with *A.donax* (407 GJ ha⁻¹.y⁻¹) with only one harvest. *Panicum virgatum* was the less productive with a single cut (292 GJ ha⁻¹.y⁻¹) but had the lowest moisture and ash content (15 % and 4.9 % respectively), which would reduce costs in energy production. With a single harvest in August, a material with lower ash and moisture content would be achieved in the three species.

Keywords: *Arundo donax*, crops energy, harvest, *Panicum virgatum*, *Pennisetum purpureum*

3.3. Introducción

Existe la preocupación a nivel mundial por el aumento de la demanda de energía y las proyecciones que reflejan el agotamiento de los combustibles fósiles en pocas décadas. Esto junto a otros factores, impulsan la necesidad de investigar en la producción de fuentes alternativas de energía, entre ellas la utilización de biomasa. Coincidiendo con esta visión, Ra *et al.* (2012), explican que debido al aumento del precio del combustible fósil y la necesidad de reducir la emisión de gases de efecto invernadero, se estimuló el aumento de la producción global de energía renovable a partir de biomasa particularmente a partir del año 2000. Heaton *et al.* (2004), menciona que la energía de la biomasa de los cultivos lignocelulósicos contiene típicamente rangos de 17 a 21 MJ kg⁻¹, solo ligeramente menor que la de los combustibles fósiles tales como el carbón (21 a 28 MJ kg⁻¹) en combustión directa. La utilización de cultivos perennes tiene como ventajas, según McLaughlin *et al.* (1999), que ayudarían a reducir la degradación de los suelos, bajarían la dependencia en petróleo y reducirían las emisiones de gases de efecto invernadero. En Uruguay se plantea diversificar la matriz energética y para lograr esto, una meta es aumentar la oferta de energía generada por la biomasa a través del cultivo de *Arundo donax* (Caño común), *Panicum virgatum* (Switchgrass) y *Pennisetum purpureum* (Pasto elefante). Estas especies se caracterizan por producir altos niveles de biomasa, entre 10 a 40 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Fontoura *et al.* 2014, Falasca *et al.* 2011, Angelini *et al.* 2009, 2005).

Las especies *P. virgatum*, *P. purpureum* tienen ciclo fotosintético tipo C₄ y *A. donax* tipo C₃. Son cultivos perennes, herbáceos, caracterizados por la producción de tallos que contienen lignina, celulosa y hemicelulosa, componentes de alto contenido calórico. Acorde con lo expuesto por Nassi o Di Nasso *et al.* (2010), Fike *et al.* (2006), Heaton *et al.* (2004), la cosecha no debería comenzar hasta que el cultivo este totalmente senescente, cosechas tempranas podrían resultar en alta extracción de nutrientes y altos contenidos de humedad de la biomasa. Nassi o Di Nasso *et al.* (2010) sugieren que es posible que estrategias alternativas como el momento de cosecha puedan mejorar la calidad de la biomasa de Caña común. En relación a la calidad de la biomasa, Bulpitt (2009) y McLaughlin *et al.* (1999), encontraron contenidos de cenizas para *A. donax* y *P. virgatum*, cercanos a los recomendados

para cultivos energéticos, entre 4 a 6 %. El contenido de cenizas de *P.purpureum*, sería cercano a los valores deseados, de entre 6,45 (Ukanwoko *et al.* 2012) y 7,2 (Ribeiro *et al.*, 2014), pero existen reportes de hasta 14,6 % (Ullah *et al.* 2010). Los contenidos de humedad en la biomasa varían según la especie entre 14 a más de 50 % (Dragoni *et al.* 2011, Smith y Slater 2011, McLaughlin *et al.* 1999).

Los impactos en la plantación de cultivos perennes podrían aumentar el contenido de carbono en el suelo al aumentar las entradas de carbono al sistema suelo y al disminuir las pérdidas ligadas al proceso de erosión y respiración (Angelini *et al.* 2009, Boehmel *et al.* 2008).

Se ha observado que la producción de biomasa varió según se realizaran un corte o dos cortes. En años con stress hídrico los cultivos de *P.virgatum* rindieron más al realizar un solo corte, mientras en años normales rindieron más al realizarle dos cortes (Reynolds *et al.* 2000, McLaughlin *et al.* 1999). Vogel *et al.* (2002), recomiendan dos cosechas anuales a diferencia de Rinehart (2006) quien recomienda una sola cosecha, para esta especie. Thomason *et al.* (2005), lograron la mayor producción de biomasa al realizar tres cortes al año, con un incremento de 3,4 Mg ha⁻¹ año⁻¹ sobre el sistema de un solo corte. En *P. purpureum* se observaron aumentos de rendimiento al aumentar de 60 a 120 los días entre cortes (Madera *et al.* 2013, Tessema *et al.* 2010, Ansah *et al.* 2010). Los contenidos de cenizas y humedad de la biomasa dependieron del momento de cortes, los niveles de extracción y contenidos de humedad disminuyeron en el corte de invierno en *P.purpureum* (Ansah *et al.* 2010) y en *P.virgatum* (McLaughlin *et al.* 1999).

En Uruguay existe escasa información acerca de la producción de materia seca de los cultivos de *A.donax*, *P.virgatum* y *P.purpureum*. Al ser especies de orígenes diferentes, es posible que su potencial productivo y calidad de biomasa, varíen acorde al número de cosechas anuales. Se planteó como objetivo identificar la especie y número de cosechas anuales, que logre el mayor rendimiento potencial, mayor producción de energía y mejor calidad de biomasa. Al ser cultivos perennes y de alta producción de biomasa, es posible que haya variación en la composición química del suelo entre los tres cultivos, debido a cambios en los proceso de ganancia y pérdida de COS, así como diferencias en la extracción de

nutrientes. Se comparó el contenido de COS del suelo, K, N y P, al término del experimento, con el objetivo de identificar el impacto de cada cultivo y manejos de cosecha, en el recurso suelo.

3.4. Materiales y métodos

3.4.1. Ubicación del experimento

El experimento se realizó en la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” (EEMAC) de la Facultad de Agronomía, UdelaR, ubicada en el departamento de Paysandú (32 ° 21 ´ S y 58 ° 02 ´ W; 61 m de altitud) en Uruguay, sobre suelos clasificados como Brunosoles Eutricos Típicos Fr de la unidad cartográfica San Manuel (Altamirano *et al.* 1976). En el (Cuadro 1) se presenta el resumen de datos climáticos para el período de estudio, acorde a los registros de la estación meteorológica de la Estación Experimental.

Los cultivos energéticos evaluados fueron *Panicum virgatum* (*P.virgatum*), *Arundo donax* (*A.donax*) y *Pennisetum purpureum* (*P.purpureum*). Los cultivos se instalaron en la primavera del 2007 y el período de evaluación aquí presentado se realizó desde el corte de enero del 2012 al corte de agosto del 2013. *Panicum virgatum* se cultivó de semilla con una población objetivo de 1.000.000 plantas ha⁻¹, *P.purpureum* y *A.donax* se cultivaron por esquejes, con una población objetivo de 20000 pl ha⁻¹. Cada parcela se confeccionó de 3 m de ancho y 5 m de largo. El experimento se diseñó en bloques completos al azar con tres repeticiones.

Se realizaron dos tratamientos de corte: en el tratamiento de dos cortes se realizó uno en enero y otro en agosto; en el tratamiento de un solo corte éste se realizó en agosto.

Cuadro 1. Variables climáticas para el período de evaluación, tomadas en la Estación Experimental “M.A. Cassinoni”

Fecha	T ⁽¹⁾	PP	Rad. ⁽²⁾	Fecha	T	PP	Rad.
	°C	mm	MJ m ⁻²		°C	mm	MJ m ⁻²
10/2011	17	205	558	01/2013	24	53,8	818
11/2011	22	132	780	02/2013	23	142	605
12/2011	23	73	837	03/2013	19	137	570
01/2012	26	73	868	04/2013	18	80	435
02/2012	24	409	580	05/2013	14	230	270
03/2012	21	186	589	06/2013	12	5	270
04/2012	18	91	420	07/2013	12	60	267
05/2012	17	119	310	08/2013	11	26	400
06/2012	12	41	246	09/2013	15	103	438
07/2012	9	22	322	10/2013	18	110	651
08/2012	15	287	310				
09/2012	16	164	453				
10/2012	18	382	499				
11/2012	22	41	738				
12/2012	24	480	747				

(¹)T: Temperatura promedio mensual; PP: precipitación mensual; (²)Rad: radiación promedio mensual.

3.4.2. Evaluación de la producción

En las tres primeras cosechas se realizó el corte del total de la parcela, mientras en agosto del 2013 se cosechó un área de 2,2 m² de cada parcela. Todos los cortes se realizaron a una altura de 10 a 15 cm. La biomasa cosechada se pesó con balanza electrónica de precisión 0,5 kg y capacidad de 100 kg.

Los tratamientos se fertilizaron luego de cada cosecha con 100 kg ha⁻¹ de nitrógeno (N) agregado en forma de urea, un mes posterior a cada cosecha de agosto.

En cada cosecha, para la determinación de materia seca se pesó una muestra fresca (aproximadamente 1 kg) se trozó a fracciones de 5 cm y secó a 60 °C durante 48 horas. La materia seca (%MS) se estimó como el cociente entre peso seco:peso fresco y se expresó en porcentaje. El contenido de humedad se estimó como la diferencia 100-(%MS). El material secado se molió hasta pasar una malla de 2 mm y se analizó el contenido total de cenizas (expresado en porcentaje), potasio (%K) y el poder calorífico (MJ kg⁻¹). En una submuestra fresca se contó el número de tallos y se estimó el peso individual en gramos de los tallos (PIT), expresado en base seca. A partir del número de tallos de la submuestra se estimó el número de tallos por metro cuadrado (N°T m⁻²).

3.4.3. *Evaluación de propiedades químicas del suelo*

Para evaluar en el suelo los niveles finales de K intercambiable (K_{int}), P Bray I (P_{BrayI}), N total (N_{total}) y COS se realizó el muestreo en octubre del año 2013, en el sexto año de los cultivos. Se extrajeron muestras de suelo a la profundidad de 0 a 20 cm, 20 a 40 cm y 40 a 60 cm en todos los tratamientos. Las muestras fueron secadas a 40°C, molidas hasta pasar por malla 2 mm y enviadas al laboratorio para su análisis. La determinación de K_{int} se realizó mediante extracción con acetato de amonio y posterior determinación en espectrometría de llama por emisión atómica (Jackson, 1964); el contenido de P_{BrayI} se realizó acorde al extractante propuesto por Bray y Kurtz (1945) y el contenido de P en el extracto se determinó por desarrollo de color azul del complejo P-molibdato, acorde a (Murphy y Riley, 1962); el N total se determinó por digestión húmeda acorde a una modificación de la técnica de Kjeldahl propuesta por Bremner (1965); y COS se determinó mediante digestión húmeda acorde a Tynsley (1967).

3.4.4. *Análisis estadístico*

La producción de materia fresca y seca se analizó por modelos mixtos, con el software InfoStat/P (Di Rienzo *et al.*, 2012). Al haber medidas repetidas en el tiempo se consideraron a las parcelas como efecto aleatorio. Los niveles de COS , N_{total}, P Bray I, K_{int}, % K, cenizas y poder calórico, se analizaron como modelo general lineal. Se consideraron efectos significativos del ANAVA aquellos con p<0,1 y se consideró que existió tendencia en los efectos con p<0,2. Todas las medias se compararon por test de Fisher con alfa=0,10. La

estimación de producción de materia seca a partir de PIT y N°T m⁻² se evaluó por el ajuste de la regresión obtenida.

3.5. Resultados y discusión

3.5.1. Producción de materia seca

En el promedio de ambos años de evaluación, *A.donax* produjo aproximadamente 24 % más biomasa seca que las especies *P.virgatum* y *P.purpureum* (Cuadro 2). El rendimiento de *A.donax* fue ligeramente superior al potencial estimado por Falasca *et al.* (2011) para Argentina, para zonas con precipitaciones de 400 a 500 mm, similares a las ocurridas durante los meses de crecimiento en los dos años aquí evaluados (Cuadro 1). El rendimiento obtenido en *P.virgatum* también fue ligeramente superior al esperable en climas templados, según lo sugerido por Searle y Malins (2014). Petruzzi (2010) reportó rendimientos de 5,0 a 12,0 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en cultivos de *P.purpureum* en Argentina. Los rendimientos obtenidos en investigaciones de *P.purpureum* son diversos, hay investigaciones con rendimientos de 5,0 a 16,0 Mg ha⁻¹ (Cerdas y Vallejos, 2010) y otras investigaciones de hasta 53,2 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Ra *et al.*, 2012). A nivel nacional se obtuvo un rendimiento de 45 Mg ha⁻¹ con tres cortes anuales (Bemhaja, 2000). La variabilidad es, como en las otras especies, atribuible a la adaptación climática, variedades y prácticas de manejo.

En *A.donax* y *P.virgatum* la mayor producción de biomasa seca fue en el tratamiento de un solo corte (Cuadro 2). Al realizar dos cortes se obtuvo mayor producción en enero que en agosto. La cosecha de enero puede haber comprometido el rebrote y producción, lo que explicaría la menor cosecha de agosto. *P. virgatum* y *A.donax* presentaron mayor producción en enero que *P.purpureum*, por lo que puede suponerse que presentaron mayor crecimiento inicial. Ambas especies fueron, también, las de menor producción en agosto al realizarle dos cortes. Reynolds *et al.* (2000) y McLaughlin *et al.* (1999) observaron un mayor rendimiento en cultivos de *P.virgatum* al realizar dos cortes al año, pero en los sitios o años que hubo stress hídrico, los rendimientos fueron mayores al realizar un solo corte. McLaughlin *et al.* (1999) consideran que al realizar dos cortes se perjudica el crecimiento radicular y en condiciones de stress hídrico se comprometería la absorción de agua necesaria para el rebrote. Vogel *et al.* (2002) recomiendan realizar dos cosechas al año, la última en estado de R3 a R5 y señalan

que postergar la cosecha a estadios de mayor madurez puede disminuir el rendimiento. Rinehart (2006) recomienda realizar un solo corte anual de *P.virgatum* en cultivos con fines energéticos. En *P. purpureum* el tratamiento de un solo corte produjo más materia seca en el año 2012, pero no hubo diferencias en el año 2013. En esta especie, a diferencia de *A. donax* y *P.virgatum*, el corte de agosto produjo más que el corte de enero. *Pennisetum purpureum* podría tener mayor capacidad de rebrote, que las otras dos especies y si las condiciones climáticas fueran favorables el rendimiento al realizar dos cortes alcanzaría al de realizar un solo corte. Las lluvias concentradas en diciembre del 2012 habrían permitido, al cultivo, superar la etapa de mayor demanda hídrica durante el rebrote pos corte. Madera *et al.* (2013), Tessema *et al.* (2010) y Ansah *et al.* (2010), obtuvieron aumentos de rendimiento al distanciar la frecuencia de corte de 60 a 90 días y la mayor producción fue al cosechar cada 120 días. En el año 2012, las escasas lluvias ocurridas hasta febrero (Cuadro 1) acentuaron el efecto adverso del corte de enero en *A.donax* y *P.virgatum*, ya que ese año se apreció la mayor diferencia de rendimiento respecto a agosto. En *P.purpureum* la diferencia entre el corte de enero y agosto fueron similares para ambos años de evaluación.

Al comparar la producción de materia seca de *P. purpureum* y *A. donax* con dos cortes, la primera especie produjo menos que la segunda en el promedio de los dos años. Con un solo corte *P. purpureum* produjo menos materia seca que *A. donax* en el año 2013 (Cuadro 2). La posible razón de este resultado podría ser que *P. purpureum* fue más afectado por las deficiencias hídricas que *A. donax* y que las precipitaciones concentradas en diciembre del 2012, no cubrieron tales déficit, a diferencia de febrero del 2012.

Cuadro 2. Producción de materia seca de cada especie en cada año y cortes

		2012			2013		
Especie	Número de cortes	enero	agosto	Total	enero	agosto	Total
Mg ha ⁻¹							
<i>A. donax</i>	un corte	--	23,0	23,0	--	24,4	24,4
	dos cortes	9,8	3,7	13,5	8,2	5,7	13,9
<i>P. purpureum</i>	un corte	--	21,7	21,7	--	15,1	15,1
	dos cortes	3,9	5,7	9,6	4,5	7,9	12,4
<i>P. virgatum</i>	un corte	--	15,8	15,8	--	17,7	17,7
	dos cortes	11,3	2,9	14,2	9,3	3,0	12,3
DMS		2,1	3,2	3,8	1,6	2,8	3,3

†. DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

El N°T m⁻² y el PIT, fueron apropiados indicadores del rendimiento de materia seca en las tres especies. En *A. donax* el PIT explicó el 60 % de la variación en producción de materia seca, mientras que el N°T m⁻² no tuvo una relación significativa. Angelini *et al.* (2009), al trabajar con *A. donax* obtuvieron una correlación positiva entre rendimiento, altura y diámetro del tallo, lo cual se puede considerar un resultado similar al aquí obtenido, ya que el PIT dependería en parte del grosor del tallo, aunque esta relación no se evaluó en el presente trabajo. En *P. virgatum* ambos componentes tuvieron una relación satisfactoria con la producción de biomasa seca. El PIT explicó el 65 % de la variación observada y el N°T m⁻² el 47 %. Boe y Beck (2008) observaron resultados similares para esta especie, ya que las variables de mayor relación con el rendimiento fue N°T m⁻² y peso del fitomero, el cual podría estar relacionado con PIT, aunque esta relación no fue estudiada. En *P. purpureum* el PIT explicó el 47 % del rendimiento y el N°T m⁻² explicó el 25 % del rendimiento. Oliveira *et al.* (2011) determinaron una relación satisfactoria entre rendimiento y altura de los tallos, aunque no fue una variable medida en el presente trabajo, es esperable que la altura sea influenciada por N°T m⁻² debido a la competencia por luz que se genera al aumentar la densidad. Aunque no puede llegarse a información concluyente, sería posible suponer que ambas serían indicadores de interés al evaluar el desempeño de los cultivares de *A. donax* y *P. virgatum*. En el caso de la especie *P. purpureum* sería necesario considerar otras variables, como ser altura del tallo y/o peso de los fitomeros.

En *P.virgatum* al realizar dos cortes al año se producen tallos más livianos en agosto y menor N°T m⁻², que al realizar un corte al año. Igual tendencia se observó en *P.purpureum* y *A.donax*, en ambas variables, pero dichas diferencias no fueron significativas. Este comportamiento se pudo deber a que el corte de enero no fue suficiente para que el cultivo tuviese suficientes fotoasimilados para un correcto rebrote. Los rebrotes alcanzados no tuvieron suficiente tiempo de crecimiento como para lograr un peso equiparable al de los cultivos que tuvieron un solo corte.

3.5.2. Contenido de humedad

Al considerar el contenido de humedad de cada especie (cuadro 3) en la cosecha de agosto, *P. virgatum* tuvo el menor contenido de humedad (15 %), el mayor contenido de humedad lo tuvo *P. purpureum* (57 %) y *A. donax* tuvo un valor intermedio (34 %). *P. virgatum* cumple con los requisitos exigidos a la materia prima que se utiliza en la producción de energía a partir de biomasa. Las otras dos especies deberían retirarse del campo con un estado de deshidratación mayor o ser secadas artificialmente. Al investigar estos cultivos con fines energéticos, McLaughlin *et al.* (1999) cuantificaron para *P. virgatum* un contenido de humedad de 15 %. Los contenido de humedad reportados para cosechas de *A.donax* van desde 14 a 30 % (Smith y Slater 2011, Bulpitt 2009) y hasta 61 % (Dragoni *et al.*, 2011). Para *P.purpureum* los contenidos de humedad son ligeramente superiores en la bibliografía consultada (Ribeiro 2014, Zetina 2013, Ukanwoko 2012), debido probablemente, a diferencias en el momento de cosecha.

En *P.purpureum* el contenido de humedad del corte de agosto fue mayor al realizar dos cortes al año (Cuadro 3). Similar tendencia se observó en las otras dos especies, pero la diferencia no fue significativa. Es posible que al realizar dos cortes, los tallos que comienzan la senescencia al final del período de crecimiento hayan generado tejidos con menores paredes celulares. En el sistema de dos cortes el contenido de humedad en enero (entre 56 a 74 % promedio) fue mayor que en el corte de agosto en las tres especies. Lo cual era esperable porque los tejidos de enero habrían logrado menor lignificación. La especie que tiene el menor contenido de humedad en agosto con el tratamiento de dos cortes es *P. virgatum* (14 %), valor esperado para esta materia prima.

Cuadro 3. Contenido de humedad (%) por especie, año y corte

Especie	2012		2013	
	enero	agosto	enero	Agosto
	% Humedad			
<i>A.donax</i>	57	44	59	27
		40		26
<i>P.purpureum</i>	72	55	75	69
		50		55
<i>P.virgatum</i>	51	18	60	11
		19		10

3.5.3. Carbono en el suelo

La profundidad de 0 a 20 y 40 a 60 cm, presentaron diferencias de COS a causa de las diferentes especies y por el número de cortes que se realizaron. No se observaron estos efectos en la profundidad de 20 a 40 cm. El suelo cultivado con *P.purpureum* fue el que presentó mayor contenido de COS a la profundidad de 0 a 20 cm (Cuadro 4). *Pennisetum purpureum* fue la especie de mayor producción pos corte de enero y la que tuvo mayor humedad al momento del corte, por lo que es presumible que haya mayor caída de hojas al comenzar el período de heladas, las cuales son un aporte de carbono al suelo. En la profundidad de 40 a 60 cm, *P.virgatum* presentó mayor contenido que *A.donax*, mientras que el suelo cultivado con *P.purpureum* tuvo un nivel intermedio (Cuadro 4). Esto podría explicarse por diferencias en el crecimiento radicular entre especies, pero no se realizaron mediciones que permitan abordar este aspecto. En ambas profundidades la mayor cantidad de COS se favoreció por el tratamiento de un solo corte. Esto puede estar asociado a la mayor producción de biomasa lograda en este tratamiento. McLaughlin *et al.* (1999) sugieren que al realizar dos cortes en *P.virgatum* se puede perjudicar el crecimiento radicular, por lo que al realizar dos cortes es posible que se haya logrado menor aporte de C al suelo al haber producido menos raíces. Esta especie podría favorecer el aumento de COS , acorde a lo expuesto por Dou *et al.* (2013), Jung y Lal (2011), Omonode y Vyn (2006), Lobo y Porfirio

(2004) y McLaughlin *et al.* (1999). Sarkhot *et al.* (2012) observaron aumento del COS al cabo de 40 años de cultivo de *A.donax*. El aumento de COS que se pueda lograr con estas especies dependerá de la producción de biomasa y del tiempo de crecimiento, lo cual determinará mayor aporte de C. Al tratarse de cultivos perennes, se reducen las pérdidas de C del sistema a través de la mineralización y erosión.

Cuadro 4. Contenido de COS (g kg^{-1}) en el suelo para cada especie, número de corte y por profundidad de muestreo.

	<i>P.purpureum</i>	<i>P. virgatum</i>	<i>A.donax</i>	DMS ($p \leq 0,10$)†
	Un Corte			
0-20	23,4	20,7	19,9	0,05
20-40	14,7	15,3	13,6	ns
40-60	8,6	8,9	7,5	ns
Media de un corte	15,6	15,0	13,7	ns
	Dos Cortes			
0-20	22,0	19,9	19,8	0,14
20-40	13,9	13,5	13,2	ns
40-60	7,4	8,5	6,4	0,13
Media de dos cortes	14,4	14,0	13,1	ns
Media	15,0	14,5	13,4	ns

†. DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

3.5.4. Fósforo en el suelo

En la profundidad de 0 a 20 cm el valor de P_Brayl en *P.virgatum* (19 mg kg^{-1}) fue mayor que en *A.donax* (9 mg kg^{-1}), mientras que *P.purpureum* tuvo valor intermedio (15 mg kg^{-1}) (Cuadro 5). No hubo diferencias entre los tratamientos de cortes. La especie *A.donax* fue la de mayor rendimiento, por lo que es de suponerse que exporte mayor cantidad de P en su cosecha. Es posible que *P.purpureum* tenga mayor concentración de P en su biomasa al momento de la cosecha. Las profundidades de 20 a 40 y 40 a 60 cm tuvieron 3 mg kg^{-1} P_Brayl y no hubo diferencias entre especies ni cortes. La mayor cantidad de P_Brayl en superficie se debió a la estratificación esperable debido a la ausencia de laboreos en cultivos perennes.

Cuadro 5. Contenido de P_Brayl (mg kg⁻¹) en el suelo para cada especie, número de corte y por profundidad de muestreo.

	<i>P.purpureum</i>	<i>P. virgatum</i>	<i>A.donax</i>	DMS (p≤0,10)†
	Un Corte			
0-20	17,77	23,37	9,01	Ns
20-40	4,38	3,17	3,16	Ns
40-60	3,65	2,43	2,68	Ns
Media de un corte	8,60	9,66	4,95	Ns
	Dos Cortes			
0-20	13,14	13,88	9,74	Ns
20-40	3,65	2,63	2,19	Ns
40-60	4,26	3,16	2,19	Ns
Media de dos cortes	7,02	6,56	4,71	Ns
Media	7,81	8,11	4,83	Ns

†. DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

3.5.5. Potasio en el suelo

En los primeros 20 cm de suelo, los tratamientos cultivados con *A.donax* y *P.purpureum* tuvieron mayor contenido de K_{int}, 0,92 y 0,80 meq.100g⁻¹ respectivamente, que los cultivados con *P.virgatum*, que tuvieron 0,58 meq.100g⁻¹ (Cuadro 6). Las especies *A.donax* y *P.purpureum* tuvieron mayor concentración de K en la biomasa que *P.virgatum*, por lo que es de esperar que al senescer sus tejidos aportaran más K a la superficie del suelo. No hubo diferencias generadas por el tratamiento de corte. La profundidad de 20 a 40 cm tuvo un contenido promedio de K_{int} de 0,74 meq.100g⁻¹ para todos los tratamientos. En la profundidad de 40 a 60 cm, el suelo cultivado con *P.purpureum* presentó 1,2 meq.100g⁻¹, lo cual fue superior al suelo cultivado con *P.virgatum*, que presentó 0,98 meq.100g⁻¹. El suelo de los tratamientos con *A.donax* tuvieron un valor promedio de 1,11 meq.100g⁻¹, el cual no se diferenció de los otros dos casos. Es posible que *P.virgatum* haya tenido una absorción relativa mayor de K a esta profundidad dado por la mayor cantidad de raíces, ya que a esa profundidad el contenido de COS del suelo cultivado con *P.virgatum* fue mayor.

Cuadro 6. Contenido de K_{int} (meq.100g⁻¹) en el suelo para cada especie, número de corte y por profundidad de muestreo.

	<i>P.purpureum</i>	<i>P. virgatum</i>	<i>A.donax</i>	DMS (p≤0,10)†
	Un Corte			
0-20	0,86	0,73	0,91	Ns
20-40	0,80	0,76	0,70	Ns
40-60	1,01	1,03	1,03	Ns
Media de un corte	0,89	0,84	0,88	Ns
	Dos Cortes			
0-20	0,74	0,44	0,92	0,12
20-40	0,92	0,61	0,65	Ns
40-60	1,39	0,93	1,2	0,35
Media de dos cortes	1,02	0,66	0,92	0,29
Media	0,95	0,75	0,9	0,17

†. DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

3.5.6. Potasio en la biomasa

La especie *P.purpureum* fue la que tuvo mayor contenido de K, 2,12 %, *A.donax* presentó un contenido intermedio de 0,77 % K, mientras *P.virgatum* fue la especie de menor concentración de K, 0,32 %. *P.purpureum* tuvo mayor contenido de humedad al momento de cosecha y se puede suponer que tuvo menor translocación de K a los órganos de reserva. McLaughlin *et al.* (1999), consideran que en *P.virgatum*, la alta relación de tallo:hoja puede favorecer los bajos valores de K en la biomasa.

El corte de enero tuvo mayor contenido de K que el de agosto, en las tres especies (Cuadro 7). Esto puede deberse a la translocación de K ocurrida a finales de la etapa de crecimiento, previo a la cosecha de agosto y a las diferencias en la relación hoja:tallo entre ambas cosechas. La especie que tuvo mayor diferencia relativa entre el K medido en enero y agosto, fue *P.virgatum*, mientras la que presentó menor diferencia fue *P.purpureum*.

El contenido de K en agosto fue mayor en los cultivos de dos cortes en *P.purpureum*, 2,09 % K, que con un solo corte, 1,59 % K. En las otras dos especies no hubo diferencias entre el número de cortes. En *P.purpureum* el rebrote luego del corte de enero no habría logrado la misma translocación que la biomasa generada desde comienzos del período de crecimiento.

Pennisetum purpureum tuvo la mayor extracción de K ($293 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) de las tres especies evaluadas, al realizar una sola cosecha. Mientras *P.virgatum* tuvo la menor extracción al realizar un solo corte, la cual fue de tan solo $17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de K. La alta exportación de K del cultivo *P. purpureum* no se vio reflejada en los contenidos de K_{int}, esto pudo deberse a que esta especie absorbe K desde formas no cuantificadas por la técnica de análisis o al reciclaje discutido anteriormente.

Lo niveles de % K de las cosechas de agosto 2013 fueron mayores que en el año 2012. El rebrote luego de la cosecha de enero del 2013 pudo sufrir estrés hídrico ya que las precipitaciones fueron menores en ese año. Nassi o Di Nasso *et al.* (2010), observaron un incremento de K en biomasa de *A.donax* debido al estrés hídrico.

Cuadro 7. Contenido de K (%) en la biomasa en las tres especies, según número y momentos de cortes.

	<i>P.purpureum</i>	<i>P.virgatum</i>	<i>A.donax</i>	DMS ($p \leq 0,10$)
	Un Corte			
Agosto	1,59	0,11	0,45	0,34
	Dos Cortes			
Enero	2,69	0,77	1,27	0,14
Agosto	2,09	0,10	0,61	0,60
Media	2,12	0,33	0,78	0,35

†. DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

3.5.7. Nitrógeno en el suelo

P.purpureum fue la especie que tuvo más N en los primeros 20 cm de suelo, 0,19 % N, mientras *A.donax* y *P.virgatum* tuvieron 0,16 y 0,15 %, respectivamente (Cuadro 8). Este resultado fue el esperable, ya que *P.purpureum* fue la que presentó mayor contenido de COS a esta profundidad. No hubo efecto del número de cortes en esta variable. En el resto de las profundidades de muestreo, no hubo efecto de la especie ni del número de cortes. Era esperable, sin embargo, que existiese una mayor extracción de N en los sistemas de dos cortes y en consecuencia una menor cantidad de N en los suelos de estos sistemas. Reynolds *et al.* (2000), en *P.virgatum*, cuantificaron mayor remoción de N al realizar dos cortes que un solo corte y McLaughlin *et al.* (1999), observaron que los cultivos de *P.virgatum* cosechados dos veces al año extrajeron entre 3,0 hasta 5,6 veces más N que los cultivos

cosechados una sola vez. En este estudio no se cuantificó la extracción de N realizada, por lo que no es posible concluir sobre este aspecto.

Cuadro 8. Contenido de N en suelo (%) para cada especie, número de corte y por profundidad de muestreo.

	<i>P.purpureum</i>	<i>P. virgatum</i>	<i>A.donax</i>	DMS ($p \leq 0,10$)†
	Un Corte			
0-20	0,20	0,17	0,15	0,04
20-40	0,13	0,13	0,12	ns
40-60	0,09	0,08	0,08	ns
Media de un corte	0,14	0,13	0,12	ns
	Dos Cortes			
0-20	0,19	0,14	0,17	ns
20-40	0,12	0,12	0,13	ns
40-60	0,09	0,08	0,08	ns
Media de dos cortes	0,13	0,11	0,13	ns
Media	0,14	0,12	0,12	ns

†. DMS: diferencia mínima significativa por test de Fisher.

3.5.8. Contenido de cenizas

Las especies *A.donax* y *P.purpureum* fueron las que presentaron mayor porcentaje de cenizas, al igual que en la evaluación del contenido de K. En el mes de enero, *A.donax* y *P.purpureum* presentaron contenidos de 14,8 y 14,1 % respectivamente, los cuales fueron mayores al contenido de agosto, de 5,6 y 6,3 % respectivamente. *Panicum virgatum* presentó menores contenidos en ambas cosechas, de 4,3 y 5,5 % para la cosecha de agosto y enero respectivamente. Los menores contenidos de cenizas evaluados en agosto concuerdan con lo esperable acorde a lo observado por McLaughlin *et al.* (1999), al estudiar *P. virgatum* y Ansah *et al.* (2010), al estudiar *P.purpureum*. Con el atraso de la cosecha, al haber ocurrido el envejecimiento de los tejidos, es esperable que el contenido de minerales (cenizas) de los tejidos sea menor, debido al proceso de translocación o lixiviación de los mismos desde las hojas. La reducción en el contenido de cenizas que incluye paralelamente la reducción en K, puede ser atribuido a la mayor proporción de tallo:hoja con el retraso de la cosecha y contribuye de forma importante en disminuir los residuos que generan problemas en la combustión (McLaughlin *et al.*, 1999). Es deseable además, que estos materiales posean

altos contenidos de carbohidratos de alto peso molecular, como celulosa, hemicelulosa y lignina, lo cual brinda mayor poder calórico por unidad de peso.

3.5.9. Poder calorífico

Pennisetum purpureum y *A. donax* tuvieron mayor poder calorífico en el corte de agosto (Cuadro 9). En *P. virgatum* no hubo diferencias en el poder calorífico entre épocas de corte y tuvo mayor poder calorífico que las otras dos especies en enero. Una posible explicación para los resultados obtenidos es, que en agosto habría menos contenido de cenizas producto de la translocación de los minerales y por lo tanto, la composición de la biomasa sería principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina.

El tratamiento de mayor producción de energía por hectárea fue *A. donax* con un solo corte (Cuadro 9) y el tratamiento de menor producción fue *P. purpureum* con dos cortes.

Cuadro 9. Poder calorífico y producción de energía, por especie, mes de corte y número de cortes.

Especie	Poder calorífico		Producción de energía	
	Enero	Agosto	Un corte	Dos cortes
	MJ kg^{-1}	MJ kg^{-1}	GJ ha^{-1}	GJ ha^{-1}
<i>A. donax</i>	15,2	17,2	407	217
<i>P. purpureum</i>	15,2	17,4	320	182
<i>P. virgatum</i>	17,3	17,3	289	229

3.6. Conclusiones

La mayor producción de energía se lograría con el cultivo de *A. donax* a través de una única cosecha en agosto. Al realizar una sola cosecha se disminuiría el costo energético, se lograría un material con menor contenido de cenizas, humedad y se extraería menor cantidad de K del sistema. El cultivo de *P. virgatum* fue el de menor producción de energía con un solo corte, pero tendría la ventaja de ser un material con bajo contenido de humedad, lo cual abarataría el costo de transporte y procesamiento previo a la combustión, a la vez que es el material de menor contenido de cenizas y extracción de K. *Pennisetum purpureum* produjo valores intermedios de energía, además de los mejores valores de COS y N en suelo, pero a

causa de los altos valores de humedad, extracción de K y cenizas, es cuestionable su calidad como materia prima y la sostenibilidad en el sistema.

3.7. Bibliografía

- Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echevarría A, Panario D, Puentes R. 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay: Tomo III Apéndice- parte 2: Descripciones, datos físicos y químicos de los suelos dominantes. Montevideo: Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes.
- Angelini LG, Ceccarini L, Bonari E. 2005. Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundo donax* L.) cropped in central Italy as related to different management practices. *European Journal of Agronomy*. 22: 375–389.
- Angelini LG, Ceccarini L, Nassi o Di Nasso N, Bonari E. 2009. Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus x giganteus* in a long-term field experiment in Central Italy: Analysis of productive characteristics and energy balance. *Biomass and Bioenergy*. 33: 635–643.
- Ansah T, Osafo ELK, Hansen HH. 2010. Herbage yield and chemical composition of four varieties of Napier (*Pennisetum purpureum*) grass harvested at three different days after planting. *Agriculture and Biology Journal of North America*. 1(5): 923-929.
- Bemhaja M. 2000. Pasto Elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) INIA Lambaré. Montevideo. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, 72: 15p.
- Boe A, Beck DL. 2008. Yield Components of Biomass in Switchgrass. *Crop Science*. 48(4): 1306-1311.
- Boehmel C, Lewandowski I, Claupein W. 2008. Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. 96: 224-236.
- Bray, R.H.; Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, Baltimore, 59: 39-45
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. *In*: Black, C.A., [ed]. *Methods of Soil Analysis*. Agronomy N° 9, part 2. 1149-1178

- Bulpitt WS. 2009. Fuel properties and combustion Theory. En: McGowan TF. (Ed.). Biomass and Alternate Fuel Systems: An Engineering and Economic Guide. New Jersey. Wiley. 13-35.
- Cerdas R, Vallejos E. 2010. Productividad del pasto Camerún (*Pennisetum purpureum*) con varias dosis de nitrógeno y frecuencias de corte en la zona seca de Costa Rica. InterSedes. XI (22): 180-195.
- Di Rienzo JA, Cassanoves F, Balzrini MG, González L, Cuadroda M, Robledo CW. 2012. InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Dou FG, Hons FM, Ocumpaugh WR, Read JC, Hussey MA, Muir JP. 2013. Soil Organic Carbon Pools Under Switchgrass Grown as a Bioenergy Crop Compared to other Conventional Crops. Pedosphere 23(4): 409–416.
- Dragoni FF, Ragaglini GG, Nassi o Di Nasso NN, Tozzini CC, Bonari EE. 2011. Suitability of giant reed and miscanthus for biogas: preliminary investigations on harvest time and ensiling. Aspects of Applied Biology. 112: 291-296.
- Falasca S, Flores MN, Galvani G. 2011. ¿Puede usarse una especie invasora como *Arundo donax* (caña común) con fines energéticos en Argentina?. [En línea]. Citado el 5 de mayo 2014. Disponible en: <http://ebookbrowse.net/file-name-inta-arundo-donax-con-fines-energeticos-en-argentina-pdf-d314127398>.
- Fike JH, Parrish DJ, Lobo DD, Wolf DD, Balasko JA, Green JT, Rasnake M, Reynolds JH. 2006. Long-term yield potential of switchgrass-for-biofuel systems. Biomass and Bioenergy. 30(3): 198-206.
- Fontoura CF, Brandão LE, Lima Gomes L. 2014. Elephant grass biorefineries: towards a cleaner Brazilian energy matrix?. *Journal of Cleaner Production*. Article in Press.
- Heaton EA, Brown-Clifton J, Voigt TB, Jones MB, Long SP. 2004. Miscanthus for renewable energy generation: European Union experience and projections for Illinois. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 9(4): 433-451.
- Jackson, M.L. 1964. Análisis químico de suelos. Ediciones Omega S.A. Barcelona. 662 p

- Jung JY, Lal R. 2011. Impacts of nitrogen fertilization on biomass production of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) and changes in soil organic carbon in Ohio. *Geoderma*. 166(1): 145-152.
- Lobo A, Porfirio J. 2004. Changes in soil carbon and nitrogen associated with switchgrass production. Master's thesis, Texas A&M University. Texas A&M University. [En línea]. Citado el 24 de junio 2014. Disponible en: <http://repository.tamu.edu/handle/1969.1/1258>.
- Madera NB, Ortiz B, Bacab HM, Magaña H. 2013. Influencia de la edad de corte del pasto morado (*Pennisetum purpureum*) en la producción y digestibilidad *in vitro* de la materia seca. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 17(2): 41-52.
- McLaughlin S, Bouton J, Bransby D, Conger B, Ocumpaugh W, Parrish D, Taliaferro C, Vogel K, Wullschlegel S. 1999. Developing switchgrass as a bioenergy crop. p. *En*: Janick J [Ed]. *Perspectives on new crops and new uses*. ASHS Press, Alexandria, VA. pp. 282–299.
- Murphy, J.; Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, Washington, 27: 31-36
- Nassi o Di Nasso N, Angelini LG, Bonari E. 2010. Influence of fertilisation and harvest time on fuel quality of giant reed (*Arundo donax* L.) in central Italy. *European Journal of Agronomy*. 32(3):219-227.
- Oliveira T, Pereira JC, Reis C, Queiroz A, Cecon P, Gomes S. 2011. Composição químico-bromatológica do capim-elefante submetido à adubação química e orgânica. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, Salvador. 12(1):32-42.
- Omonode RA, Vyn TJ. 2006. Vertical distribution of soil organic carbon and nitrogen under warm-season native grasses relative to croplands in west-central Indiana, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 117(2/3): 159-170.

- Petruzzi H. 2010. Pasto varilla –cultivo bio-energético. [En línea]. Citado el 24 de junio de 2014. Disponible en: http://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/37-Residuos_cultivos.pdf.
- Ra K, Shiotsu F, Abe J, Morita S. 2012. Biomass yield and nitrogen use efficiency of cellulosic energy crops for ethanol production. *Biomass and Bioenergy*. 37: 330 – 334.
- Reynolds JH, Walker CL, Kirchner MJ. 2000. Nitrogen removal in switchgrass biomass under two harvest systems. *Biomass and Bioenergy*. 19(5): 281-286.
- Ribeiro LSO; Pires AJV; de Carvalho GGP; Pereira MLA; dos Santos AB; Rocha LC. 2014. Fermentation characteristics, chemical composition and fractionation of carbohydrates and crude protein of silage of elephant grass wilted or with addition of castor bean meal. *Ciências Agrárias, Londrina*. 35(3): 1447 – 1462.
- Rinehart, L. 2006. Switchgrass as a Bioenergy Crop. [En línea]. Citado el 24 de junio de 2014. Disponible en: <https://attra.ncat.org/attra-pub/summaries/summary.php?pub=311>.
- Sarkhot DV, Grunwald S, Morgan CLS, Geb Y. 2012. Total and available soil carbon fractions under the perennial grass *Cynodon dactylon* (L.) Pers and the bioenergy crop *Arundo donax* L. *Biomass and Bioenergy*. 41: 122–130.
- Searle SY, Malins CJ. 2014. Will energy crop yields meet expectations?. *Biomass and Bioenergy*. *In press*.
- Smith RR, Slater FM. 2011. Mobilization of minerals and moisture loss during senescence of the energy crops *Miscanthus × giganteus*, *Arundo donax* and *Phalaris arundinacea* in Wales, UK. *GCB Bioenerg*. 3(2): 148-157.
- Tessema ZK, Mihret J, Solomon M. 2010. Effect of defoliation frequency and cutting height on growth, dry-matter yield and nutritive value of Napier grass (*Pennisetum purpureum* (L.) Schumach). *Grass and Forage Science*. 65: 421–430.
- Thomason WE, Raunb WR, Johnsonb GV, Taliaferrob CM, Freemanb KW, Wynn KJ, Mullenb RW. 2005. Switchgrass Response to Harvest Frequency and Time and Rate of Applied Nitrogen. *Journal of Plant Nutrition*. 27 (7): 1199-1226.

- Tynsley, J. 1967. Soil Science. Manual of experiments. University of Aberdeen. Departament of Soil Science. 124 p
- Ukanwoko AI, Igwe NC. 2012. Proximate Composition of Some Grass and Legume Silages Prepared in a Humid Tropical Environment. International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science. 2(2): 068 – 071.
- Ullah MA, Anwar M, Rana AS. 2010. Effect of nitrogen fertilization and harvesting intervals on the yield and forage quality of elephant grass (*Pennisetum purpureum*) under mesic climate of pothowar plateau. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 47(3): 231-234.
- Vogel KP, Brejda JJ, Walters DT, Buxton RD. 2002. Switchgrass Biomass Production in the Midwest USA: Harvest and Nitrogen Management. *Agronomy Journal*. 94: 413 – 420.
- Zetina-Cordoba P, Ortega-Cerrilla ME, Ortega-Jimenez E, Herrera-Haro JG, Sanchez-Torres-Esqueda MT, Reta-Mendiola JL, Vilaboa-Arroniz J, Munguia-Ameca G. 2013. Effect of cutting interval of Taiwan grass (*Pennisetum purpureum*) and partial substitution with duckweed (*Lemna sp.* and *Spirodela sp.*) on intake, digestibility and ruminal fermentation of Pelibuey lambs. *Livestock Science*. 157: 471 – 477.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA

La especie que tuvo el mayor rendimiento fue *A.donax*, seguido de *P.virgatum* y *P.purpureum*, en ambos experimentos. La mayor producción de materia seca se alcanzó con la fertilización con nitrógeno y con un solo corte en las tres especies, lo cual concuerda con lo observado por varios investigadores (Pedroso *et al.*, 2014, Searle y Malins, 2014, Owens *et al.*, 2013, Sharma *et al.*, 2012, Ullah *et al.*, 2010, Rinehart, 2006, Angelini *et al.*, 2005, Reynolds *et al.*, 2000, McLaughlin *et al.*, 1999). La producción de materia seca con fertilización nitrogenada y un solo corte fue de entre 22 a 24 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para *A.donax*, para *P.virgatum* fue entre 17 y 19 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y *P.purpureum* produjo 18 Mg ha⁻¹ año⁻¹, estos rendimientos se encuentran dentro de los citados por Falasca *et al.* (2011), Petruzzi (2010) y Angelini *et al.* (2009, 2005). La respuesta promedio de las especies a la fertilización con nitrógeno fue 65 kg ha⁻¹ año⁻¹ kg⁻¹N. En los sistemas de dos cortes, *A.donax* y *P.virgatum* tuvieron mayor producción de materia seca en enero que en agosto. La cosecha de enero podría comprometer la producción de agosto. *Pennisetum purpureum* tuvo mayor producción en agosto que en enero, por ser la especie que tuvo mayor rebrote.

4.2. CONTENIDO DE HUMEDAD

El menor contenido de humedad lo presentó *P.virgatum* con 14,5 %, el mayor contenido lo tuvo *P.purpureum* con 55 % y *A.donax* tuvo un valor intermedio de 32 %. Estos contenidos de humedad promedio corresponden a los tratamientos con fertilización y un solo corte. Los contenidos de humedad observados en cada especie fueron similares para ambos experimentos y a la bibliografía consultada Dragoni *et al.* (2011), Smith y Slater (2011), McLaughlin *et al.* (1999). Al realizar dos cortes se podría aumentar el contenido de humedad de la biomasa cosechada, lo cual es desfavorable para el proceso de producción de energía. Los menores contenidos de humedad que presentó *P.virgatum* son favorables para las materias primas que son utilizadas para producir energía.

4.3. CARBONO EN EL SUELO

Los contenidos de carbono orgánico en cada una de las profundidades muestreadas, no fueron afectados por los tratamientos de fertilización ni por las especies. Los contenidos promedios de COS en suelo fueron, 1,86; 1,08 y 0,75 g.100g⁻¹, entre 0 a 20 cm, 20 a 40 cm y 40 a 60 cm de profundidad, respectivamente. A diferencia de los tratamientos con fertilización, los contenidos de COS fueron afectados por los tratamientos de cortes. Aunque las diferencias en la producción de materia seca entre los tratamientos de fertilización con N fueron similares a las observadas entre los tratamientos de números de cortes, los contenidos de COS . fueron mayores con un solo corte (2,13 g.100g⁻¹) que con dos cortes (2,05 g.100g⁻¹) en la profundidad de 0 a 20 cm. Esta menor cantidad de COS observada en el tratamiento de dos cortes se debería a diferencias en la composición de la materia orgánica incorporada y al mayor tiempo de degradación de los tejidos senescentes, desde enero al muestreo de octubre y no a la menor producción total de materia seca del tratamiento de dos cortes. Los contenidos de COS . fueron mayores con un solo corte (0,83 g.100g⁻¹) que con dos cortes (0,74 g.100g⁻¹) en la profundidad de 40 a 60 cm. Las parcelas cultivadas con *P.purpureum* presentaron mayor contenido de COS . a la profundidad de 0 a 20 cm. *Panicum virgatum* fue la especie que tuvo los mayores contenidos de COS a la profundidad de 40 a 60 cm, lo cual concuerda con lo observado por Omonode y Vyn (2006), Lobo y Porfirio (2004), McLaughlin *et al.* (1999). En la profundidad de 20 a 40 cm el contenido de COS del suelo no varió a causa de los tratamientos de cortes ni especie.

4.4. FÓSFORO EN EL SUELO

El contenido de P_{Brayl} en el suelo a la profundidad de 0 a 20 cm fue mayor en las parcelas cultivadas con *P.virgatum* fertilizadas con P (34 mg kg⁻¹) y en los sistemas de dos cortes (17 mg kg⁻¹). Las fertilizaciones y el aporte del suelo, habrían superado la extracción de los cultivos, por lo que en todos los tratamientos con fertilización existieron contenidos de P en suelo superiores a los esperables para suelos del Uruguay (Hernández y Zamalvide, 1998). La alta concentración de P en el experimento de cortes, que no fue fertilizado con P, se debería a la deposición de la materia orgánica senescente de los cultivos la cual aportaría P en superficie, el cual no es incorporado en profundidad por la ausencia de laboreo del suelo. En estos experimentos no se dispuso de la información suficiente para realizar conclusiones

acerca de las razones que provocaron los incrementos de P en los primeros 20 cm de suelo, ni para concluir acerca de las diferencias observadas entre especies.

A las profundidades mayores a 20 cm no hubo efecto de las especies, de la fertilización ni de los números de cortes en los contenidos de P_Brayl, el contenido promedio de P_Brayl a estas profundidades correspondieron a 3 mg kg⁻¹ en ambos experimentos.

4.5. POTASIO EN EL SUELO Y LA BIOMASA

A.donax fue la especie que tuvo el mayor contenido promedio de K_{int} en el suelo (0,63 meq.100g⁻¹) en los tratamientos de fertilización con N, a la profundidad de 0 a 20 cm. En el experimento de cortes, el mayor contenido de K_{int} en el suelo los tuvieron las parcelas cultivadas con *P.purpureum* (0,80 meq.100g⁻¹) y *A.donax* (0,92 meq.100g⁻¹), en los primeros 20 cm de profundidad. No hubo efecto del corte. Los menores niveles de K_{int} observados en las parcelas fertilizadas con N se deberían a la mayor extracción de K al cosechar la biomasa. Este efecto de mayor descenso de K_{int} por mayor extracción en biomasa, no fue evidente en el experimento de cortes. Es posible que el aporte de K por la senescencia de tejidos en el tratamiento de un solo corte en agosto, haya producido un incremento del K_{int} en superficie por más que la extracción de K haya sido mayor en estos tratamientos, debido al mayor rendimiento. En las profundidades mayores a 20 cm no se observaron diferencias en K_{int} entre especies, a causa de la fertilización o por diferencias en el régimen de cortes.

P.purpureum tuvo el mayor contenido de K en la biomasa, 2,12 % y *P.virgatum* el menor contenido, 0,32 %, estos bajos contenidos coinciden con lo citado por McLaughlin *et al.* (1999). La biomasa cosechada en enero tuvo mayor nivel de K, que la cosechada en agosto, en las tres especies. *Pennisetum purpureum* fue la especie que extrajo más K (293 kg ha⁻¹ año⁻¹) cuando se realizó un solo corte.

4.6. NITRÓGENO EN EL SUELO

El mayor contenido de N_{total} lo presentaron las parcelas cultivadas con *P.purpureum*, fertilizadas con nitrógeno y en ambos sistemas de cortes, 0,18 % y 0,19 %, respectivamente, en los primeros 20 cm de suelo. Es posible que la fertilización con nitrógeno produjese residuos vegetales de mayor contenido de nitrógeno, debido a la mayor humedad que

presentó la especie. La fertilización con nitrógeno podría prolongar el estado de crecimiento, al producirse las heladas la translocación de nitrógeno fue menor y las hojas senescente contendría más nitrógeno.

A la profundidad entre 20 a 40 cm los tratamientos fertilizados con nitrógeno tuvieron mayor contenido de N en suelo, para las tres especies. La fertilización con nitrógeno durante los seis años del experimento, habrían aportado nitrógeno a esta profundidad por lixiviación. La mayor producción de biomasa de las parcelas fertilizadas debería haber producido mayor cantidad de raíces que las parcelas no fertilizadas, este mayor aporte de carbono permitiría la inmovilización del nitrógeno.

No hubo efectos de las especies ni de los números de cortes en los contenidos de N_{total} en el suelo, a las profundidades mayores a 20 cm.

4.7. CONTENIDO DE CENIZAS Y PODER CALORÍFICO

Los mayores contenidos de cenizas los tuvieron *A.donax* y *P.purpureum*, los contenidos promedio en enero fueron 14,5 % y en agosto fue 6 %, estos niveles según la estación del año concuerdan con lo observado por Ansah *et al.* (2010), McLaughlin *et al.* (1999). *Panicum virgatum* tuvo el menor contenido de cenizas promedio, 5 %.

La mayor producción de energía la tuvo *A.donax* con un solo corte, 407 GJ ha⁻¹ año⁻¹ La menor producción la presentó *P.purpureum* con dos cortes, 182 GJ ha⁻¹ año⁻¹.

5. CONCLUSIONES

Los rendimientos de materia seca fueron los esperados para la región. La disponibilidad de N fue limitante para el crecimiento de las tres especies, por lo que sería necesaria la fertilización con este elemento. La disponibilidad de P fue suficiente, por lo que no sería necesaria la fertilización. *Arundo donax* tendió a producir más, independientemente de la fertilización con nitrógeno. *Arundo donax* produjo más energía con una sola cosecha. *Panicum virgatum* tuvo la menor producción de energía con un solo corte, pero tuvo los más bajos contenidos de humedad y cenizas, lo que lo haría un material con ventajas para la producción de energía. *Pennisetum purpureum* tuvo valores intermedios de energía, los más altos valores de COS . y

N en el suelo, pero tuvo altos contenidos de humedad, extracción de K y contenidos de cenizas, lo que lo haría un material con desventajas para la producción de energía.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alencar CAB, Cunha FF, Martins CE, Cóser AC, Oliveira RA, Araújo RAS. 2013. Adubação nitrogenada e estações anuais na produção de capins irrigados no este mineiro sob corte. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal* 14(3): 413-425.
- Allison GG, Morris C, Lister SJ, Barraclough T, Yates N, Shield I, Donnison IS. 2012. Effect of Nitrogen Fertiliser Application on Cell Wall Composition in Switchgrass and Reed Canary Grass. *Biomass and Bioenergy*. 40: 19-26.
- Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echevarría A, Panario D, Puentes R. 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay: Tomo III Apéndice- parte 2: Descripciones, datos físicos y químicos de los suelos dominantes. Montevideo: Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes.
- Angelini LG, Ceccarini L, Bonari E. 2005. Biomass Yield and Energy Balance of Giant Reed (*Arundo donax* L.) Cropped in Central Italy as Related To Different Management Practices. *European Journal of Agronomy*. 22: 375–389.
- Angelini LG, Ceccarini L, Nassi o Di Nasso N, Bonari E. 2009. Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus x giganteus* in a Long-Term Field Experiment in Central Italy: Analysis of Productive Characteristics and Energy Balance. *Biomass and Bioenergy*. 33: 635–643.
- Ansah T, Osafo ELK, Hansen HH. 2010. Herbage Yield and Chemical Composition of Four Varieties of Napier (*Pennisetum purpureum*) Grass Harvested at Three Different Days After Planting. *Agriculture and Biology Journal of North America*. 1(5): 923-929.
- Bemhaja M. 2000. Pasto Elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) INIA Lambaré. Montevideo. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, 72: 15p.
- Boe A, Beck DL. 2008. Yield Components of Biomass in Switchgrass. *Crop Science*. 48(4): 1306-1311.
- Boehmel C, Lewandowski I, Claupein W. 2008. Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. 96: 224-236.

- Bohn HL, McNeal BL, O'Connor GA 1993. Materia orgánica. En: Bohn HL, McNeal BL, O'Connor G.A. (Eds.). Química del suelo. México: Limusa. 155-173.
- Bray, R.H.; Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Science, Baltimore, 59: 39-45
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. In: Black, C.A., [ed]. Methods of Soil Analysis. Agronomy N° 9, part 2. 1149-1178
- Bulpitt WS. 2009. Fuel Properties and Combustion Theory. En: McGowan TF. (Ed.). Biomass and Alternate Fuel Systems: An Engineering and Economic Guide. New Jersey. Wiley. 13-35.
- Cerdas R, Vallejos E. 2010. Productividad del pasto Camerún (*Pennisetum purpureum*) con varias dosis de nitrógeno y frecuencias de corte en la zona seca de Costa Rica. InterSedes. XI (22): 180-195.
- Di Rienzo JA, Cassanoves F, Balzrini MG, González L, Cuadroda M, Robledo CW. 2012. InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- DNE (Dirección Nacional de Energía). 2012. Balance 2012. Montevideo: DNE (Dirección Nacional de Energía). 44 p. Consultado 20 enero 2014. Disponible en: <http://www.dne.gub.uy/documents/15386/0/BALANCE%20ENERGETICO%202012.pdf>.
- Dou FG, Hons FM, Ocumpaugh WR, Read JC, Hussey MA, Muir JP. 2013. Soil Organic Carbon Pools Under Switchgrass Grown as a Bioenergy Crop Compared to other Conventional Crops. Pedosphere 23(4): 409–416.
- Dragoni FF, Ragaglini GG, Nassi o Di Nasso NN, Tozzini CC, Bonari EE. 2011. Suitability of Giant Reed and Miscanthus for Biogas: Preliminary Investigations on Harvest Time and Ensiling. Aspects of Applied Biology. 112: 291-296.
- Falasca S, Flores MN, Galvani G. 2011. ¿Puede usarse una especie invasora como *Arundo donax* (caña común) con fines energéticos en Argentina?. [En línea]. Citado el 5 de

mayo 2014. Disponible en: <http://ebookbrowse.net/file-name-inta-arundo-donax-con-fines-energeticos-en-argentina-pdf-d314127398>.

Fike JH, Parrish DJ, Lobo DD, Wolf DD, Balasko JA, Green JT, Rasnake M, Reynolds JH. 2006. Long-Term Yield Potential of Switchgrass-for-Biofuel Systems. *Biomass and Bioenergy*. 30(3): 198-206.

Flores RA, Urquiaga S, Alves JR, Collier LS, Boddey RM. 2012. Yield and Quality of Elephant Grass Biomass Produced in the Cerrados Region for Bioenergy. *Engenharia Agrícola*. 32(5): 831-839.

Fontoura CF, Brandão LE, Lima Gomes L. 2014. Elephant Grass Biorefineries: Towards a Cleaner Brazilian Energy Matrix?. *Journal of Cleaner Production*. Article in Press.

Gagne-Bourgue FF, Aliferis KA, Seguin PP, Rani MM, Samson RR, Jabaji SS. 2013. Isolation and Characterization of Indigenous Endophytic Bacteria Associated with Leaves of Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) Cultivars. *Journal of Applied Microbiology*. 114(3): 836-853.

Garten JCT, Brice DJ, Castro HF, Graham RL, Mayes MA, Phillips JR, Post WM, Schadt, CW, Wulschleger SD, Tyler DD, Jardine, PM, Jastrow JD, Matamala R, Miller RM, Moran KK, Vugteveen TW, Izaurralde RC, Thomson AM, West TO, Amonette JE, Bailey VL, Metting FB, Smith JL. 2011. Response of "Alamo" Switchgrass Tissue Chemistry and Biomass to Nitrogen Fertilization in West Tennessee, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 140 (1-2): 289-297.

Hall KE, George JR, Riedl RR. 1982. Hbage Dry Matter Yields of Switchgrass, Big Bluestem, and Indiangrass with N Fertilization. *Agronomy Journal*. 74(1): 47-51.

Haque M, Epplin FM, Taliaferro CM. 2009. Nitrogen and Harvest Frequency Effect on Yield and Cost for Four Perennial Grasses. *Agronomy Journal*. 101:1463–1469.

Heaton E, Voigt T, Long SP. 2004. A Quantitative Review Comparing the Yields of Two Candidate C4 Perennial Biomass Crops in Relation To Nitrogen, Temperature and Water. *Biomass and Bioenergy*. 27(1) 21:30.

- Hernández J, Zamalvide JP. 1998. Procesos de retención de fósforo por los suelos evaluados a través de parámetros de suelo y planta. *Agrociencia*. 2(1): 48-63.
- Jackson, M.L. 1964. Análisis químico de suelos. Ediciones Omega S.A. Barcelona. 662 p
- Ji J, Lal R, Jastrow JD, Tyler DD. 2011. Nitrogenous Fertilizer Effects on Soil Structural Properties Under Switchgrass. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 141(1/2): 215-220.
- Jung JY, Lal R. 2011. Impacts of Nitrogen Fertilization on Biomass Production of Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) and Changes in Soil Organic Carbon in Ohio. *Geoderma*. 166(1): 145-152.
- Lee DK, Owens VN, Doolittle JJ. 2007. Switchgrass and Soil Carbon Sequestration Response to Ammonium Nitrate, Manure, and Harvest Frequency on Conservation Reserve Program Land. *American Society of Agronomy*. 99:462-468.
- Lemus R, Brummer EC, Moore KJ, Molstad NE, Burras CL, Barker MF. 2002. Biomass Yield and Quality of 20 Switchgrass Populations in Southern Iowa, USA. *Biomass and Bioenergy*. 23: 433 – 442.
- Lobo A, Porfirio J. 2004. Changes in Soil Carbon and Nitrogen Associated with Switchgrass Production. Master's thesis, Texas A&M University. Texas A&M University. [En línea]. Citado el 24 de junio 2014. Disponible en: <http://repository.tamu.edu/handle/1969.1/1258>.
- Ma Z, Wood C.W., Bransby D.I. 2000. Carbon dynamics subsequent to establishment of switchgrass. *Biomass and Bioenergy*. 18(2): 93-104.
- Madera NB, Ortiz B, Bacab HM, Magaña H. 2013. Influencia de la edad de corte del pasto morado (*Pennisetum purpureum*) en la producción y digestibilidad *in vitro* de la materia seca. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 17(2): 41-52.
- McLaughlin S, Bouton J, Bransby D, Conger B, Ocumpaugh W, Parrish D, Taliaferro C, Vogel K, Wullschlegel S. 1999. Developing Switchgrass as a Bioenergy Crop. P. *En*: Janick J

[Ed]. Perspectives on New Crops and New Uses. ASHS Press, Alexandria, VA. pp. 282–299.

McLaughlin SB, Kszos LA. 2005. Development of Switchgrass (*Panicum virgatum*) as a Bioenergy Feedstock in the United States. *Biomass and Bioenergy*. 28: 515-535.

Murphy, J.; Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, Washington, 27: 31-36

Nassi o Di Nasso N, Angelini LG, Bonari E. 2010. Influence of Fertilisation and Harvest Time on Fuel Quality of Giant Reed (*Arundo donax* L.) in Central Italy. *European Journal of Agronomy*. 32(3):219-227.

Oliveira T, Pereira JC, Reis C, Queiroz A, Cecon P, Gomes S. 2011. Composição químico-bromatológica do capim-elefante submetido à adubação química e orgânica. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, Salvador. 12(1):32-42.

Olivo CJ, Flores Aguirre P, da Ros de Araújo TL, Schalemborg Diehl M, Marques de Bem C, Serafim G, da Rosa Correa M. 2013. Produtividade e proteína bruta de pastagens de capim elefante manejadas sob os sistemas agroecológico e convencional. *Ciência Rural*, Santa Maria. 43(8): 1471-1477.

Omonode RA, Vyn TJ. 2006. Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Nitrogen Under Warm-Season Native Grasses Relative To Croplands in West-Central Indiana, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 117(2/3): 159-170.

Owens VN, Viands DR, Mayton HS, Fike JH, Farris R, Heaton E, Bransby DI, Hong, CO. 2013. Nitrogen Use in Switchgrass Grown for Bioenergy Across the USA. *Biomass and Bioenergy*. 58: 286-293.

Palmer IE, Gehl RJ, Ranney TG, Touchell D, George, N. 2014. Biomass Yield, Nitrogen Response, and Nutrient Uptake of Perennial Bioenergy Grasses in North Carolina. *Biomass and Bioenergy*. 63: 218-228.

Parrish DJ, Fike JH. 2005. The Biology and Agronomy of Switchgrass for Biofuels. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 24(5/6): 423-459.

- Pedroso GM, Hutmacher RB, Putnam D, Six J, van Kessel C, Linquist BA. 2014. Biomass Yield and Nitrogen Use of Potential C4 and C3 Dedicated Energy Crops in a Mediterranean Climate. *Field Crops Research*. 161: 149-157.
- Petruzzi H. 2010. Pasto varilla –cultivo bio-energético. [En línea]. Citado el 24 de junio de 2014. Disponible en: http://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/37-Residuos_cultivos.pdf.
- Piscioneri I, Pignatelli V. 2003. An Evaluation of Biomass Yield Stability of Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) Cultivars. *Energy Conversion and Management*. 44(18): 2953–2958.
- Ra K, Shiotsu F, Abe J, Morita S. 2012. Biomass Yield and Nitrogen Use Efficiency of Cellulosic Energy Crops for Ethanol Production. *Biomass and Bioenergy*. 37: 330 – 334.
- Reynolds JH, Walker CL, Kirchner MJ. 2000. Nitrogen Removal in Switchgrass Biomass Under Two Harvest Systems. *Biomass and Bioenergy*. 19(5): 281-286.
- Ribeiro LSO; Pires AJV; de Carvalho GGP; Pereira MLA; dos Santos AB; Rocha LC. 2014. Fermentation characteristics, chemical composition and fractionation of carbohydrates and crude protein of silage of elephant grass wilted or with addition of castor bean meal. *Ciências Agrárias, Londrina*. 35(3): 1447 – 1462.
- Rinehart, L. 2006. Switchgrass as a Bioenergy Crop. [En línea]. Citado el 24 de junio de 2014. Disponible en: <https://attra.ncat.org/attra-pub/summaries/summary.php?pub=311>.
- Rodríguez L, Larduet R, Ramos N, Martínez RO. 2013. Modelling of Dry Matter Yield of *Pennisetum purpureum* Cv. King Grass with Different Cutting Frequencies and N Fertilizer Dosages. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 47(3): 227 – 232.
- Sarkhot DV, Grunwald S, Morgan CLS, Geb Y. 2012. Total and Available Soil Carbon Fractions Under the Perennial Grass *Cynodon dactylon* (L.) Pers and the Bioenergy Crop *Arundo donax* L. *Biomass and Bioenergy*. 41: 122–130.

- Schmer MR, Liebig MA, Vogel KP, Mitchell RB. 2011. Field-Scale Soil Property Changes Under Switchgrass Managed for Bioenergy. *GCB Bioenergy*. 3(6): 439-448.
- Schmer MR, Vogel KP, Mitchell RB, Perrin RK. 2008. Net Energy of Cellulosic Ethanol from Switchgrass. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 105(2): 464-469.
- Searle SY, Malins CJ. 2014. Will Energy Crop Yields Meet Expectations?. *Biomass and Bioenergy*. *In press*.
- Sharma AK, Bharat R, Rai PK, Sharma R. 2012. Farmyard Manure and Nitrogen Application at Different Planting Dates on Napier (*Pennisetum purpureum* Shum.). *Environment & Ecology*. 30(3C): 1185 – 1191.
- Shen H, Wang X, Shi W, Cao Z, Yan X. 2001. Isolation and Identification of Specific Root Exudates in Elephantgrass in Response to Mobilization of Iron- and Aluminum-Phosphates. *Journal of Plant Nutrition*. 24(7): 1117 – 1130.
- Sladden SE, Bransby DI, Aiken GE. 1991. Biomass Yield, Composition and Production Costs for Eight Switchgrass Varieties in Alabama. *Biomass and Bioenergy*. 1(2): 119–122.
- Smith RR, Slater FM. 2011. Mobilization of Minerals and Moisture Loss During Senescence of the Energy Crops *Miscanthus x giganteus*, *Arundo donax* and *Phalaris arundinacea* in Wales, UK. *GCB Bioenerg*. 3(2): 148-157.
- Tessema ZK, Mihret J, Solomon M. 2010. Effect of Defoliation Frequency and Cutting Height on Growth, Dry-Matter Yield and Nutritive Value of Napier Grass (*Pennisetum purpureum* (L.) Schumach). *Grass and Forage Science*. 65: 421–430.
- Thomason WE, Raunb WR, Johnsonb GV, Taliaferrob CM, Freemanb KW, Wynn KJ, Mullenb RW. 2005. Switchgrass Response to Harvest Frequency and Time and Rate of Applied Nitrogen. *Journal of Plant Nutrition*. 27 (7): 1199-1226.
- Tulbure MG, Wimberly MC, Boe A, Owens VN. 2012. Climatic and Genetic Controls of Yields of Switchgrass, a Model Bioenergy Species. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 146: 121-129.

- Tynsley, J. 1967. Soil Science. Manual of experiments. University of Aberdeen. Departament of Soil Science. 124 p
- Ukanwoko AI, Igwe NC. 2012. Proximate Composition of Some Grass and Legume Silages Prepared in a Humid Tropical Environment. International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science. 2(2): 068 – 071.
- Ullah MA, Anwar M, Rana AS. 2010. Effect of nitrogen fertilization and harvesting intervals on the yield and forage quality of elephant grass (*Pennisetum purpureum*) under mesic climate of pothowar plateau. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 47(3): 231-234.
- Videira SS, Oliveira D, Morais R, Borges WL, Baldani VD, Baldani JI. 2012. Genetic Diversity and Plant Growth Promoting Traits of Diazotrophic Bacteria Isolated from Two *Pennisetum purpureum* Schum. Genotypes Grown in the Field. *Plant and Soil*. 356(1/2): 51-66.
- Vogel KP, Brejda JJ, Walters DT, Buxton RD. 2002. Switchgrass Biomass Production in the Midwest USA: Harvest and Nitrogen Management. *Agronomy Journal*. 94: 413–420.
- Xu JJ, Kloepper JW, McInroy JJ, Hu CH, Bonilla RR. 2011. Isolation and Characterization of Nitrogen-Fixing and Phosphate-Solubilizing Bacteria from *Arundo donax* L. (Giant Reed). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) for Sustainable Agriculture. Proceedings off the 2nd Asian PGPR Conference, Beijing, China, 21-24 August, 2011, 409-415.
- Zan CS, Fyles JW, Girouard P, Samson RA. 2001. Carbon Sequestration in Perennial Bioenergy, Annual Corn and Uncultivated Systems in Southern Quebec. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 86: 135–144.
- Zetina-Cordoba P, Ortega-Cerrilla ME, Ortega-Jimenez E, Herrera-Haro JG, Sanchez-Torres-Esqueda MT, Reta-Mendiola JL, Vilaboa-Arroniz J, Munguia-Ameca G. 2013. Effect of cutting interval of Taiwan grass (*Pennisetum purpureum*) and partial substitution with duckweed (*Lemna* sp. and *Spirodela* sp.) on intake, digestibility and ruminal fermentation of Pelibuey lambs. *Livestock Science*. 157: 471 – 477.