Rev. FCA UNCUYO. 2018. 50(1): 47-60. ISSN impreso 0370-4661. ISSN (en línea) 1853-8665.

Evaluación de crecimiento, rendimiento y calorimetría de biomasa de *Miscanthus x giganteus (Poaceae)* establecido en el centro-sur de Chile

Evaluation of growth, yield and calorific value of *Miscanthus x giganteus (Poaceae)* biomass established in south central of Chile

Fernando Muñoz [1], Jorge Cancino [1], Roque Rodríguez [2], Rodrigo Olave [3]

Originales: *Recepción:* 06/05/2016 - *Aceptación:* 18/10/2016

Resumen

Se establecieron cultivos experimentales de *Miscanthus x giganteus* en tres sitios contrastantes del centro-sur de Chile para evaluar su crecimiento y potencial energético. Al segundo año de crecimiento el cultivo presentó grandes diferencias entre sitios, altura (52,1 a 158,2 cm), rendimiento en biomasa (1,1 a 9,0 Mg ha^{-1}), contenido de cenizas (3,8 a 9,6%) y poder calorífico (16,64 a 18,14 MJ kg^{-1}). La composición química de la biomasa indicó celulosa en un 36%, hemicelulosa con 22,3% y lignina con 26,9%. El análisis elemental indicó 41,9% de C y 6,6% de H. *Miscanthus x giganteus* presenta condiciones para su utilización en la generación de energía en Chile.

Palabras clave
biomasa • dendroenergía • cultivos dendroenergéticos • energía renovable

1 Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. Victoria 631. Concepción. Chile. fmunoz@udec.cl
2 Universidad de Santiago de Compostela. Escuela Técnica Superior de Lugo. España.
3 Agri-Food & Biosciences Institute. Northern Ireland. United Kingdom.

Abstract

Experimental crops of *Miscanthus x giganteus* were planted in three contrasting sites in Chile's south central to evaluate its growth and energy potential. In the second year of growth, the crop exhibited large differences among sites regarding height (52.1 to 158.2 cm), biomass yield (1.1 to 9.0 Mg ha^{-1}), ash content (3.8 to 9.6%) and calorific value (16.64 to 18.14 MJ kg^{-1}). The chemical composition of the biomass indicated cellulose 36%, hemicellulose 22.3% and lignin 26.9%. Elemental analysis indicated C and H content of 41.9% and 6.6% respectively. Therefore, *Miscanthus x giganteus* offers suitable attributes to be used for energy generation in Chile.

Keywords
biomass • wood energy • crops for wood energy • renewable energy

Introducción

La generación de energía eléctrica en Chile desde fuentes renovables corresponde solo al 11,4% de la capacidad eléctrica total (7). Una alternativa para incrementar la producción de energía renovable es utilizar biomasa a partir de cultivos dendroenergéticos, creando también, oportunidades para reducir el abandono paulatino de cultivos tradicionales, mejorar el uso de terrenos subutilizados y ocupar superficies forestales abandonadas (33).

Entre las especies posibles de utilizar para producir biomasa se encuentra *Miscanthus x giganteus* J. M. Greef & Deuter ex Hodk. & Renvoize, la cual ha sido ampliamente cultivada en Europa como fuente de bioenergía por más de 30 años (30) en diferentes condiciones de sitio (1).

Miscantus x giganteus es una gramínea perenne que posee características adecuadas para producir biomasa para energía, ya que, entre otras, almacena carbono en el suelo, no es invasiva debido a que es un híbrido que no produce semillas viables (1, 5) y su propagación es solo vegetativa (23), tiene alta eficiencia en el uso del agua y bajo requerimiento de fertilizantes. En una misma superficie produce más etanol que el producido por cultivos de maíz y pasto varilla (switchgrass) (*Panicum virgatum* L.) (15) y además, *Miscanthus* presenta una razón energética (salida de energía/entrada de energía) mayor (47,3) que otros cultivos como maíz utilizado en la producción de biocombustibles (5,5) (12).

El género *Miscanthus* pertenece a la familia *Poaceae* con alrededor de 14 especies (30), la mayoría originarias del este de Asia.

Miscanthus x giganteus es un híbrido estéril (triploide) producto del cruzamiento entre *M. sinensis* (diploide) y *M. sacchariflorus* (tetraploide) (1, 16), que se cree ocurrió en forma natural debido a que en su hábitat ocurre con frecuencia hibridación entre especies de *Miscanthus* (21). Esta planta es de interés para los productores, ya que puede ser utilizada como fuente de biocombustible o celulosa (34), también como fijadora de nitrógeno (19) y para su uso en biorremediación (38).

El rendimiento de biomasa depende de varios factores, incluyendo el genotipo y nutrición (20), edad de corta (2, 8) y

condiciones de sitio (24, 28). Un gran número de genotipos del género han sido estudiados y *Miscanthus x giganteus* tiene gran potencial de producción de biomasa comparado con otros genotipos y además, no es invasivo (5).

Miscanthus ha demostrado ser excepcionalmente productivo en ensayos en el centro-oeste de Estados Unidos, incluso mejor que la especie perenne tolerante al frío C4 "pasto varilla" o "switchgrass" (*Panicum virgatum)* (15). Al ser una planta C4, se caracteriza por una alta absorción de CO_2 y bajo consumo de agua (26), crece rápidamente y produce altos rendimientos anuales de biomasa (23).

En Irlanda, el rendimiento de la especie al primer año de establecimiento es de 1-2 Mg ha^{-1}, al segundo año entre 4-10 Mg ha^{-1} y al tercer año entre 10-13 Mg ha^{-1} o más (6).

Miscanthus es un cultivo lignocelulósico que ha sido ampliamente investigado como posible materia prima para papel, energía, materiales de construcción, geotextiles y sustratos en viveros e invernaderos (23), e incluso en la producción de combustible líquido (5). Del mismo modo, la sacarificación de la biomasa de *Miscanthus* ha sido reconocida como una fuente de azúcares mixtos de bajo costo, con uso potencial para la fermentación a etanol, combustible o productos químicos (38). Sin embargo, su principal uso es la producción de energía, siendo considerado una excelente especie para estos fines (13).

El poder calorífico superior anhidro de *Miscanthus* es alrededor de 17 MJ kg^{-1}, pudiendo alcanzar 20 MJ kg^{-1} (5), con 2,7% de contenido de cenizas; ha sido utilizado en co-combustión con carbón y en calderas de producción de vapor (38).

En Chile no hay experiencia en la producción de biomasa de *Miscanthus* para uso en la generación de energía. La presente investigación tiene por objetivo introducir y establecer cultivos experimentales de *Miscanthus x giganteus* en tres sitios del centro-sur de Chile, para evaluar su crecimiento, rendimiento en biomasa, características energéticas y composición química durante sus dos primeros años de desarrollo.

La necesidad de conocer la variación del crecimiento de la especie según diferente condición climática, edáfica y material genético, lleva a definir la siguiente hipótesis: la respuesta de crecimiento y calidad de biomasa para energía de clones de *Miscanthus x giganteus* presenta interacción genotipo-ambiente. Para ello, el estudio comprende evaluar el comportamiento de la especie en sitios contrastantes (zonas agroclimáticas diferentes) ubicados en el valle central y sector costero de la zona centro-sur de Chile.

Metodología

Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en tres sitios del centro-sur de Chile, *i.e.* El Vergel, La Isla y Trehualemu. El sitio El Vergel (36°50'30" S y 72°54'26" O) se ubica en la comuna de Concepción, Región del Biobío. Pertenece a la zona agroclimática del secano costero (10), de clima templado cálido con estación seca de 4 a 5 meses, entre noviembre y marzo. Posee una temperatura promedio anual de 12,2°C con máximas y mínimas en el período estival de 22,8°C y 8,9°C e invernal 12,9°C y 5,1°C (10).

La precipitación media anual es de 1196 mm y la evapotranspiración potencial de 660 mm (10). El suelo, con una pendiente general de 30%, corresponde a la serie Treguaco (TG); son suelos profundos del tipo Inceptisol, formados a partir de rocas metamórficas, de textura franco arcillo limosa en todo el perfil.

El sitio La Isla (36°44'12" S y 72°26'49" O) se ubica en la comuna de Quillón, Región del Biobío. Pertenece a la zona agroclimática del valle central, de clima mediterráneo templado cálido con estación seca de 4 a 5 meses, entre noviembre y marzo. Posee una temperatura promedio anual de 13,5°C con máxima y mínima en el período estival de 28,0°C y 10,9°C e invernal 12,3°C y 3,7°C, respectivamente (10).

La precipitación media anual es de 1055 mm y evapotranspiración potencial de 846 mm (10). El suelo, de pendiente general entre 0% y 3%, corresponde a la serie Llahuecuy (LHY); son suelos profundos, bien drenados del tipo Entisol (29).

El sitio Trehualemu (35°58'29" S y 72°45'8" O) está ubicado en la comuna de Pelluhue, Región del Maule. El sitio pertenece a la zona agroclimática del secano costero, de clima templado cálido con estación seca de 4 a 6 meses, entre octubre y marzo. Posee una temperatura promedio anual de 14,1°C con máximas y mínimas en el período estival de 24,4°C y 12,0°C e invernal 14,6°C y 6,0°C, respectivamente (10).

La precipitación media anual es de 898 mm y la evapotranspiración potencial de 720 mm, con vientos predominantes en la época de otoño e invierno de dirección NE del Pacífico (10). El suelo, de pendiente general entre 5% y 8%, corresponde a la serie Cobquecura (CBC); son suelos profundos, sedimentarios, de textura franco arcillo limosa, que pertenecen al tipo Inceptisol (29).

Material vegetal y establecimiento

El material vegetal utilizado fueron rizomas de *Miscanthus x giganteus* (clon "Picoplant", Oldenburg, Alemania) importados desde la Universidad de Catania, Italia y de la Universidad de Santiago de Compostela, España (clon "Hornum", Hornum, Dinamarca).

El establecimiento de los ensayos consistió en la delimitación del área de estudio, preparación del suelo y siembra de los rizomas de *Miscanthus x giganteus,* en adelante *Miscanthus*.

La delimitación del área de estudio, *i.e.* instalación de cerco perimetral con malla cuadrada galvanizada, se realizó con el fin de impedir el ingreso de animales domésticos que pudieran causar daños a las plantas.

La preparación del suelo, incluyó subsolado mecanizado hasta los 80 cm de profundidad, con 2 m de distancia entre líneas de subsolado, y control químico de malezas con herbicida sin efecto residual.

En cada sitio del ensayo, en octubre de 2011, se sembraron los rizomas de *Miscanthus* en áreas de tamaño 20 x 20 cm y 10 cm de profundidad ubicadas en la línea de subsolado. Al área rectangular correspondiente a cada rizoma en adelante se le menciona como "casilla". Antes de depositar el rizoma en la casilla, se incorporó al suelo 2 g de hidrocapturador y 1 litro de agua.

Luego de sembrar el rizoma se cubrió con una capa de suelo de 5 a 8 cm. Después de la plantación y hasta abril de 2012, se efectuó riego semanal de 1 litro de agua por planta. Un mes después de la siembra se realizó una aplicación de fertilizantes (8) compuesta por una mezcla de fosfato diamónico (100 g), sulfato doble de potasio y magnesio (Sulpomag®, 50 g) y boronatrocalcita (25 g), la cual se aplicó en una pequeña zanja de 10-15 cm de profundidad a una distancia de 30-40 cm de la planta.

Diseño experimental y parcelas de medición

En cada sitio, el ensayo consistió en un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo factorial, con cada factor, *i.e.* genotipo y densidad de siembra, en dos niveles y tres repeticiones.

Se evaluó la densidad de siembra de 20.000 y 40.000 brotes ha^{-1} y el efecto de dos clones de *Miscanthus*, *i.e.* "Picoplant" y "Hornum"; en lo que sigue de este artículo, esos niveles son denominados D1 y D2 para el factor densidad, y M1 y M2 para el factor genotipo, respectivamente.

La unidad experimental consistió en una parcela cuadrada de 25 m^2 (5 x 5 m). Ambas densidades de siembra D1 y D2 presentaron 24 rizomas (para igual número de casillas) por parcela, con un espaciamiento de 0,625 m sobre la línea de siembra y 1,667 m entre cada línea.

Previo a la siembra se clasificaron visualmente los rizomas de acuerdo con la cantidad de yemas que poseían. Para lograr la densidad D1 se utilizaron rizomas con una cantidad de yemas por rizoma menor a 4, en tanto que para la densidad D2 se utilizaron aquellos rizomas cuya cantidad de yemas era mayor o igual a 4.

Las parcelas de medición se ubicaron en el centro de cada parcela y fueron delimitadas por un área de borde equivalente a una línea de siembra de rizomas a cada lado de la parcela. Así, las parcelas de medición en ambas densidades D1 y D2 fueron de 6,25 m^2, *i.e.* conteniendo cada una 6 rizomas.

Mediciones y determinaciones realizadas

Para evaluar el crecimiento se midió la altura total (con huincha de medir) y se contabilizó la cantidad de brotes por rizoma en cada unidad experimental.

El registro de las variables se realizó en el mes de abril de cada período: año 2011-2012 (primera rotación) y año 2012-2013 (segunda rotación). Esta actividad, al igual que los resultados que se presentan, solo corresponde al clon "Picoplant", debido a que la siembra del clon "Hornum" no generó prácticamente ninguna planta.

La determinación de la biomasa consistió en un muestreo destructivo de las plantas de *Miscanthus* al final de cada rotación. En cada una de las unidades experimentales se seleccionó cinco casillas como muestra de biomasa para la determinación de peso verde y posterior transporte al laboratorio para su secado en estufa (105°C) hasta peso constante.

El resto de las plantas fueron cortadas y pesadas para obtener el peso verde en terreno. La determinación de la biomasa total por unidad experimental se realizó utilizando la razón de peso seco/peso fresco [1] y peso verde de la parcela [2] (14).

$$\gamma_{sv} = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_{si}}{\sum_{i=1}^{n} W_{vi}} \qquad [1]$$

donde:

Υ_{sv} = la razón de peso seco/peso fresco por unidad experimental

W_{si} = peso seco de la i-ésima muestra

W_{vi} = peso fresco de la i-ésima muestra

n = el tamaño de la muestra seleccionada para la determinación de la razón peso seco/peso fresco por unidad experimental.

$$W_s = \gamma_{sv} * \sum w_v \qquad [2]$$

donde:

W_s = peso seco estimado en la unidad experimental en g

w_v = peso fresco de la unidad experimental obtenido en terreno en g

γ_{sv} = Razón de peso seco/peso fresco de la muestra por unidad experimental.

Contenido de cenizas, calorimetría, análisis elemental y composición química

Se tomaron tres muestras de biomasa de cada densidad de cultivo en cada sitio de ensayo de 100 g cada una, las cuales se secaron en estufa (105°C) hasta peso constante y luego se trituraron en un molino hasta un tamaño al menos de 0,2 mm.

Para la determinación del contenido de cenizas tres submuestras de 1 g fueron seleccionadas, las cuales fueron sometidas a 550°C en horno hasta su calcinación. Para la determinación del poder calorífico superior (PCS) se utilizó tres submuestras de 1 g estabilizadas al aire, y luego combustionadas con exceso de oxígeno en una bomba calorimétrica, modelo PARR 6400. Los análisis se efectuaron de acuerdo con las normas españolas de biocombustibles sólidos (36, 37).

El análisis elemental y determinación de la composición química se realizó sobre una mezcla homogénea de la biomasa de las densidades por cada sitio. De esta mezcla se obtuvo dos submuestras de 1 g, para determinar el contenido total de carbono (C), hidrógeno (H) y azufre (S), en un analizador elemental FISONS, modelo EA 1108, siguiendo la norma indicada en el manual del equipo.

La composición química (celulosa, hemicelulosa, lignina, grupo acetilo) se realizó de acuerdo con la norma Tappi 222 om 98 y cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Las muestras utilizadas correspondieron a la cosecha (realizada en abril) de la segunda rotación (año 2012-2013).

Análisis estadístico

Todas las variables medidas durante los dos primeros años fueron sometidas a pruebas para determinar su normalidad y homogeneidad de varianzas.

Posteriormente se realizó análisis de varianza para determinar el efecto del sitio, del bloque jerarquizado al sitio, de la densidad de siembra y su interacción.

La clasificación de medias, cuando correspondía, se realizó mediante la prueba de Tukey (35). No se realizó análisis estadístico de la composición química de la biomasa debido al reducido número de muestras. En el proceso de datos se utilizó el programa estadístico SPSS 15.0.

Resultados

Crecimiento

La cantidad de brotes incrementa con el transcurso del tiempo. En ningún año de cultivo hubo interacción entre sitio y densidad (tabla 1, pág. 53). Independientemente de la densidad, Trehualemu es el sitio con menor cantidad de brotes (tabla 2, pág. 53).

El sitio El Vergel presentó la cantidad más alta de brotes, seguido de La Isla y luego Trehualemu. En el segundo año de cultivo no se detectó diferencias significativas entre la cantidad de brotes de los diferentes sitios (tabla 2, pág. 53).

El incremento en altura varió con la edad del cultivo. En el primer año de cultivo, no hubo interacción entre sitio y densidad y solo se detectó efecto significativo de sitio ($p<0,0034$) (tabla 1, pág. 53).

El Vergel es el sitio de mayor incremento en altura; los otros dos sitios tienen incrementos que no difieren significativamente.

En el segundo año de cultivo, se observó interacción significativa entre sitio y densidad ($p<0,0001$); en El Vergel, el mayor incremento en altura se observó en la densidad más alta de cultivo (D2), al contrario de lo que se observó en La Isla; en Trehualemu no se observaron diferencias significativas entre densidades (tabla 2, pág. 53).

Tabla 1. Significancia de factores principales en las variables número de brotes, altura, biomasa, contenido de cenizas y poder calorífico de *Miscanthus x giganteus*, clon Picoplant, al primer y segundo período de crecimiento (año 1: 2011-2012 y año 2: 2012-2013).

Table 1. Significance of main factors in variables number of shoots, height, biomass, ash content and calorific value of *Miscanthus x giganteus*, Picoplant clone, at first and second growth period (year 1: 2011-2012 and year 2: 2012-2013).

Factores	Cantidad de brotes		Altura		Biomasa		Contenido cenizas		Poder calorífico superior	
	año 1	año 2	año 1	año 2	año 1	año 2	año 1	año 2	año 1	año 2
Sitio	<0,0001	0,0397	0,0034	0,0001	<0,0001	<0,0001	-	<0,0001	-	0,0250
Bloque (Sitio)	0,5926	0,2155	0,6089	0,0570	0,0321	0,6715	-	0,1299	-	0,5732
Densidad	0,0299	0,0540	0,1130	0,5350	0,0015	0,0403	-	<0,0001	-	0,0398
Sitio x Densidad	0,8003	0,4703	0,2797	0,0034	0,0035	0,2793	-	<0,0001	-	0,3015

Tabla 2. Valores medios del número de brotes, altura, biomasa, contenido de cenizas y poder calorífico de *Miscanthus x giganteus*, clon Picoplant, al primer y segundo período de crecimiento (año 1: 2011-2012 y año 2: 2012-2013).

Table 2. Average values for the number of shoots, height, biomass, ash content and calorific value of *Miscanthus x giganteus*, Picoplant clone, at first and second growth period (year 1: 2011-2012 and year 2: 2012-2013).

Período de crecimiento		Año 1(1)			Año 2(1)		
Sitio		El Vergel	La Isla	Trehualemu	El Vergel	La Isla	Trehualemu
Cantidad de brotes, N° ha^{-1}							
Densidad	20000	110,310 Aa	89,131 Aa	24,615 Ab	316,444 Aa	373,334 Aa	189,259 Aa
	40000	130,134 Aa	100,599 Aa	37,995 Ab	541,926 Aa	449,482 Aa	268,765 Aa
Altura, cm							
Densidad	20000	88,13 Aa	58,75 Aa	63,57 Aa	110,70 Ba	85,77 Aab	66,75 Ab
	40000	115,74 Aa	60,29 Ab	69,84 Ab	158,19 Aa	52,08 Bb	64,29 Ab
Biomasa, Mg ha^{-1}							
Densidad	20000	0,204 Ba	0,122 Ba	0,031 Bb	6,560 Aa	2,040 Ab	1,133 Ab
	40000	0,369 Aa	0,136 Bb	0,051 Bc	9,014 Aa	2,469 Ab	2,042 Ab
Contenido de cenizas, %							
Densidad	20000	-	-	-	3,80 Bc	5,40 Bb	8,70 Ba
	40000	-	-	-	4,64 Ac	7,40 Ab	9,60 Aa
Poder calorífico superior, MJ kg^{-1}							
Densidad	20000	-	-	-	17,65 Aa	17,12 Aa	16,64 Aa
	40000	-	-	-	17,83 Aa	18,14 Aa	17,06 Aa

(1) Letras mayúsculas para comparar verticalmente entre densidades dentro de cada sitio; letras minúsculas para comparar horizontalmente entre sitios dentro de cada densidad; letras diferentes señalan diferencias significativas (α = 0,05).

(1) Capital letter to vertically compare between densities within each site; small letters to horizontall compare between sites within each density; different letters indicate significant differences (α = 0.05).

En la densidad D1, el incremento en altura en El Vergel es igual al de La Isla, pero superior al de Trehualemu; en la densidad D2, el incremento en altura en El Vergel es superior al de los otros dos sitios (tabla 2, pág. 53).

Biomasa

El rendimiento en biomasa varió con la edad del cultivo (tabla 1, pág. 51).

En el primer año de cultivo, se observó interacción entre sitio y densidad ($p<0,0001$); en la densidad D1 no se observó diferencias significativas en biomasa entre sitios; en la densidad D2, el rendimiento en biomasa de todos los sitios difiere significativamente; la mayor cantidad de biomasa se observó en El Vergel, seguido de La Isla y luego Trehualemu (tabla 2, pág. 53).

En el segundo año de cultivo, no hubo interacción entre sitio y densidad y solo se detectó efecto significativo de sitio ($p<0,0001$) (tabla 1, pág. 53). Independientemente de la densidad de establecimiento, El Vergel es el sitio de mayor incremento en biomasa; los otros dos sitios tienen incrementos que no difieren significativamente (tabla 2, pág. 53).

Cenizas y poder calorífico superior

La cantidad de cenizas es afectada por la interacción entre sitio y densidad (tabla 1, pág. 53).

En general, a mayor densidad del cultivo mayor es la cantidad de cenizas; la magnitud de la diferencia varió entre sitios; la mayor diferencia entre densidades se detectó en La Isla.

Todos los sitios difieren significativamente en la cantidad de cenizas; la biomasa de Trehualemu es la que genera la mayor cantidad de cenizas, seguido de la Isla y luego El Vergel (tabla 2, pág. 53).

En cuanto al Poder Calorífico Superior (PCS) solo se detectó diferencias significativas entre El Vergel y Trehualemu, siendo este último sitio el de menor PCS; no se detectó efecto de la densidad ni interacción de esta con el sitio (tabla 1, pág. 53).

Composición química y análisis elemental

Para los tres sitios, la composición química de la biomasa indica que celulosa representa la mayor participación de la materia seca, seguido de lignina y hemicelulosa (tabla 3, pág. 55).

La biomasa producida en el sitio El Vergel presenta la mayor proporción de celulosa y el sitio Trehualemu la mayor proporción de lignina. El análisis elemental de la biomasa señala que la mayor proporción corresponde a C (tabla 3, pág. 55). Los valores de C e H son similares entre sitios.

Discusión

Crecimiento

Existe diferencia de crecimiento (cantidad de brotes y altura) entre sitios. El sitio El Vergel alcanza el mejor crecimiento del cultivo y el menor en el sitio Trehualemu (tabla 2, pág. 53). Ambos sitios se localizan en la cordillera de la costa y son del tipo Inceptisol (29), aunque de diferente precipitación media anual, 1196 mm y 898 mm, respectivamente.

Se conoce que las características del sitio afectan la productividad del cultivo de *Miscanthus*, especialmente la disponibilidad de agua en la obtención de rendimientos satisfactorios (28).

Tabla 3. Composición química y análisis elemental de la biomasa de *Miscanthus x giganteus*.
Table 3. Chemical composition and elemental analysis of *Miscanthus x giganteus* biomass.

Sitio (1)	Celulosa	HC	Lignina	Grupo acetilo	Otros	C	H	N	S (2)
	% peso seco					% peso seco			
El Vergel	38,1	24,2	26,7	2,4	8,6	41,7	6,9	N.D.	< 2
La Isla	33,8	22,8	26,9	2,0	14,5	42,9	6,6	N.D.	< 2
Trehualemu	36,0	19,9	27,3	2,6	14,2	41,1	6,4	N.D	< 2
Promedio	36,0	22,3	26,9	2,3	12,5	41,9	6,6	N.D.	

(1) Mezcla de biomasa de las densidades 20.000 y 40.000 brotes ha^{-1}, (2) resultado no detectable, se informa límite de la detección. HC: Hemicelulosa, C: Carbono, H: Hidrógeno, N: Nitrógeno, S: Azufre. N.D.: No disponible.

(1) Biomass mix of densities 20,000 and 40,000 shoots ha^{-1}, (2) not detectable result, it's reported the detection limit. HC: Hemicellulose, C: Carbon, H: Hydrogen, N: Nitrogen, S: Sulfur. N.D.: Not available.

Similar tendencia se aprecia en esta investigación, donde el sitio Trehualemu, de menor precipitación, presenta prácticamente la mitad del número de brotes y altura que el sitio El Vergel; 189.259 brotes y 66,75 cm, 316.444 brotes y 110,7 cm, respectivamente (tabla 2, pág. 53).

La cantidad de brotes se encuentra en línea con lo reportado por la literatura. Para la densidad de plantación 20.000 brotes ha^{-1} el número de brotes que alcanza el cultivo en este estudio (316.444 brotes ha^{-1}, tabla 2, pág. 53) es similar al reportado (9), en cambio, la altura del cultivo en este estudio es menor a lo señalado por los mismos autores, aunque esto podría cambiar en los próximos años debido a que el crecimiento anual del cultivo se incrementa hasta alcanzar su óptimo alrededor de 7 a 10 años luego de establecido, para luego declinar y permanecer relativamente constante (2, 9, 20).

También podría cambiar debido a que las diferencias iniciales tienden a disminuir con el desarrollo del cultivo. Cultivos de *Miscanthus* establecidos en Austria de densidades iniciales entre 10.000 y 30.000 brotes ha^{-1} alcanzaron similar altura al cabo de tres años de establecidos (9). Donde ocurre una clara diferencia es en los sitios de menor calidad, como La Isla, donde la altura es de 85,77 cm para D1 y 52,08 cm para D2 (tabla 2, pág. 53), es decir una diferencia de 65%. Esto indica que en sitios de menor calidad no es posible establecer altas densidades iniciales sin afectar el crecimiento en altura del cultivo, variable que es indicadora del rendimiento del cultivo (18).

También hay que considerar la sobrevivencia y desarrollo inicial de los brotes. Al relacionar la cantidad de brotes luego del primer año del cultivo y la densidad inicial establecida, se tiene que fluctúa entre 1,0 brote y 5,5 brotes por cada brote establecido en el sitio Trehualemu y El Vergel, respectivamente (tabla 2, pág. 53). Es decir, en sitios de buena calidad la sobrevivencia y su posterior desarrollo fue mejor. Estudios reportados (17, 27) indican que la sobrevivencia es variada y fluctúa entre el 50 y 95%, dependiendo de las condiciones del sitio. La guía de mejores prácticas para cultivo de *Miscanthus* en Irlanda sugiere establecer 16.000 rizomas ha^{-1} para esperar una emergencia de 10.000 plantas ha^{-1} (6), es decir, se asume una sobrevivencia de 62,5%.

Rendimiento inicial en biomasa

La mayor producción ocurre en el sitio El Vergel, en sus dos densidades (D1 y D2), con diferencias significativas con respecto de la producción alcanzada en los otros sitios.

El mayor rendimiento para el primer período de crecimiento es de 0,369 Mg ha^{-1} y para el segundo de 9,014 Mg ha^{-1} (tabla 2, pág. 53) (biomasa cosechada al término del primer mes de otoño).

Los resultados indican que las características del sitio afectaron el desarrollo del cultivo, situación también observada en ensayos establecidos en la costa central de Italia, donde se obtuvo rendimiento en biomasa entre 5 y 29 Mg ha^{-1} (28) y en ensayos en Alemania con variación entre 0,5 y 13,7 Mg ha^{-1} (32). También afecta el rendimiento la edad del cultivo, tal como lo señalan estudios desarrollados en Dinamarca, donde se determinó que el rendimiento promedio para un período de 20 años fue de 13,1 Mg ha^{-1} con incremento durante los primeros años hasta alcanzar el óptimo entre los 7 a 8 años, para luego decrecer y permanecer relativamente contante (20).

Similar situación en EEUU donde el promedio de rendimiento de biomasa en diferentes localidades durante 8 a 10 años fue de 23,4 Mg ha^{-1}, variando entre los diferentes sitios entre 14,7 y 31,1 Mg ha^{-1} (2). También la época de cosecha del cultivo afecta el rendimiento en biomasa.

Las cosechas realizadas en otoño presentan mayor rendimiento que las realizadas en invierno (24), con disminución de hasta 40% al atrasar la cosecha de otoño a invierno (28). De acuerdo con esto, es de esperar que el cultivo logre mayores rendimientos cuando alcance su óptimo de crecimiento alrededor de los 7 a 8 años (20).

En general, la densidad inicial de establecimiento del cultivo no influyó en el rendimiento en las primeras dos etapas del cultivo. Estudios con densidades iniciales de 10.000, 20.000 y 30.000 brotes ha^{-1} determinaron que el efecto de la densidad inicial es insignificante en el rendimiento luego de cuatro años de crecimiento (9). De acuerdo con esto, es razonable sugerir una densidad inicial de 10.000 brotes ha^{-1} (1 planta m^{-2}) evitando costos excesivos en el establecimiento. Esta densidad también ha sido utilizada para estudiar rendimiento de *Miscanthus* en el medio oeste de EE.UU. (2), y se sugiere para cultivos en Illinois (EE.UU.) (27) y en Irlanda (6).

Contenido de cenizas

El contenido de cenizas varía entre sitios y densidades de establecimiento (tabla 2, pág. 53). En este estudio, el contenido de cenizas es más alto a mayor densidad de establecimiento y menor productividad del sitio.

El contenido de cenizas puede variar de acuerdo con la época de cosecha (3, 24), partición de la biomasa del cultivo (25) y su genotipo (5). Según la partición de biomasa (hoja o caña del cultivo), el contenido de cenizas en las hojas (alrededor del 6%) puede ser hasta tres veces más que lo obtenido en las cañas (3).

El contenido de cenizas obtenido con material cosechado en los sitios La Isla y Trehualemu, es mayor a los reportados por varios autores (3, 25, 38). En cambio, el contenido de cenizas obtenido en El Vergel se encuentra dentro de los rangos (3).

En los tres sitios ensayados se utilizó material del segundo año de crecimiento, cosechado a mediados de abril (primer mes de otoño) cuando la actividad foliar aún no ha cesado, probablemente con una proporción mayor de hojas y por lo tanto, de mayor contenido de cenizas.

Calorimetría

El PCS varió según sitio y densidad de establecimiento. Diversos estudios indican que el PCS fluctúa entre 18 y 20 MJ kg^{-1} (4, 31), entre 18,2 y 18,7 MJ kg^{-1} (19) y entre 16,7 y 17,3 MJ kg^{-1} (38).

En el presente estudio el PCS varió entre 16,6 y 18,1 MJ kg^{-1}, es decir, los mayores valores obtenidos se ubican en el rango inferior de los reportados (4, 25, 31). Tal como se mencionó, era de esperar que en sitios de buena calidad (caso de El Vergel) la biomasa obtenida presentara mayor proporción de caña que hojas y por lo tanto, mayores valores de PCS. La caña tiene mayor poder calorífico que las hojas, debido a la mayor cantidad de carbono que posee su biomasa (4).

Composición química

En el estudio actual y para los tres sitios, celulosa representa la mayor participación con promedio de 36% de la materia seca, seguido de lignina con 26,9% y hemicelulosa con 22,3% (tabla 3, pág. 55). Los valores de celulosa, hemicelulosa y lignina del presente estudio se encuentran entre los rangos reportados (5, 11, 38).

La biomasa producida en el sitio de buena calidad (El Vergel) presenta la mayor proporción de celulosa (38,1%) y la producida en el sitio de baja calidad (Trehualemu) mayor proporción de lignina (27,3%).

La relación entre composición química de la biomasa y la calidad de sitio se explica porque la composición varía según la partición de la biomasa, siendo celulosa y lignina mayor en cañas y hemicelulosa mayor en hojas (39).

Aunque la composición también puede variar de acuerdo con la época de cosecha. Así, la cosecha en febrero (invierno en el Hemisferio Norte) generalmente conduce a mayores contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina, para la mayoría de especies de *Miscanthus* (5).

Análisis elemental

La concentración de C e H en la biomasa seca de *Miscanthus* indica que la mayor proporción corresponde a C (41,9%) (tabla 3, pág. 55). El valor de concentración de C se encuentra por debajo de los valores reportados que indican valores de C entre 47,1 a 49,7% (5, 22).

La diferencia de valor puede deberse a diferencias de época de cosecha y partición de la biomasa aérea del cultivo.

La estimación reportada se realizó con biomasa cosechada a fines del invierno (febrero en Hemisferio Norte), en cambio la cosecha de la biomasa utilizada en el presente estudio fue realizada a inicios del otoño (abril en Hemisferio Sur). Diferencia de pocos meses en la época de cosecha, entre diciembre y febrero en el Hemisferio Norte, cambió la participación de las hojas desde 20,8% a 14,8%, respectivamente (22), llegando a pérdidas de biomasa total que puede alcanzar el 35,5% (23). Atrasar la cosecha genera cambios en la partición de la biomasa, lo que implica, aumento proporcional de la caña en el total cosechado, con ello, mayor proporción de carbono (4).

Conclusiones

El establecimiento de cultivos dendroenergéticos de *Miscanthus x giganteus* en tres sitios contrastantes del centro-sur de Chile indica que la especie presenta variaciones significativas de crecimiento. En sectores costeros, de suelos de textura franco-arcillosa-limosa con buena capacidad de retención de humedad, se obtienen los mejores

crecimientos y estos se encuentran en línea con lo reportado por la literatura. De igual manera, los parámetros calorimétricos y características químicas de la biomasa son similares a otros estudios.

Los resultados obtenidos sugieren que *Miscanthus x giganteus* presenta condiciones (rendimiento en biomasa y en energía) para su utilización en la generación energética. Sin embargo, la relación entre crecimiento del cultivo, calidad de biomasa y condiciones de sitio para el desarrollo de la especie en Chile deben ser evaluadas por un período más extenso, hasta que alcance su máximo crecimiento.

Bibliografía

1. Anderson E.; Arundale, R.; Maughan, M.; Oladeinde, A.; Wycislo, A.; Voigt, T. 2011. Growth and agronomy of *Miscanthus x giganteus* for biomass production. Biofuels. 2(1): 71-87.
2. Arundale R.; Dohleman, F.; Heaton, E.; McGrath, J.; Voigt, T.; Long, S. 2014. Yields of *Miscanthus x giganteus* and *Panicum virgatum* decline with stand age in the Midwestern USA. GCB Bioenergy. (6): 1-13.
3. Baxter X.; Darvell, L.; Jones, J.; Barraclough, T.; Yates, N.; Shield, I. 2012. Study of *Miscanthus x giganteus* ash composition-Variation with agronomy and assessment method. Fuel (95): 50-62.
4. Baxter X.; Darvell, L.; Jones, J.; Barraclough, T.; Yates, N.; Shield, I. 2014. *Miscanthus* combustion properties and variations with *Miscanthus* agronomy. Fuel. (117): 851-869.
5. Brosse N.; Dufour, A.; Meng, X.; Sun, Q.; Ragauskas, A. 2012. *Miscanthus*: a fast-growing crop for biofuels and chemicals production. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. (6): 580-598.
6. Caslin B.; Finnan, J.; Easson, L. (Eds.). 2010. *Miscanthus* best practice guidelines. Teagasc (Ireland) and Afbi (Agri-Food and Bioscience Institute, Northern Ireland), Ireland - Northern Ireland (UK). 50 p.
7. CIFES 2015. Reportes Cifes: Energías renovables en el mercado eléctrico chileno. Centro Nacional para la Innovación y Fomento de las Energías Sustentables (CIFES), Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. 7 p.
8. Christian D.; Riche, A. B.; Yates, N. E. 2008. Growth, yield and mineral content of *Miscanthus* × *giganteus* grown as a biofuel for 14 successive harvests. Industrial Crops and Products. (28): 320-327.
9. Clifton-Brown J.; Long, S.; Jorgensen, U. 2001. *Miscanthus* productivity. In: Jones M.B, Walsh M. (Eds.) *Miscanthus* for energy and fibre. Earthscan, London, UK. p: 46-67.
10. Del Pozo, A.; Del Canto, P. 1999. Áreas agroclimáticas y sistemas productivos en la VII y VIII regiones. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán. Ministerio de Agricultura, Chile. 115 p.
11. de Vrije T.; de Haas, G.; Tan, G.; Keijsers, E.; Claassen, P. 2002. Pretreatment of *Miscanthus* for hydrogen production by Thermotoga elfii. International Journal of Hydrogen Energy. (27): 1381-1390.
12. Felten, D.; Fröba, N.; Fries, J.; Emmerling, C. 2013. Energy balances and greenhouse gas-mitigation potentials of bioenergy cropping systems (*Miscanthus*, rapeseed, and maize) based on farming conditions in Western Germany. Renewable Energy. (55): 160-174.
13. Feng X.; He, Y.; Fang, J.; Fang, Z.; Jiang, B.; Brancourt-Hulmel, M.; Zheng, B.; Jiang, D. 2015. Comparison of the growth and biomass production of *Miscanthus sinensis*, *Miscanthus floridulus* and *Saccharum arundinaceum*. Spanish Journal of Agricultural Research Vol. 13(3).
14. González, O. 2014. Evaluación de crecimiento y rendimiento en biomasa de *Miscanthus x giganteus* en sus primeros años de desarrollo. Memoria para optar al título de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Chile. 44 p.

15. Heaton, E.; Dohleman, F.; Long, S. 2008. Meeting US biofuel goals with less land: the potential of *Miscanthus*. Global Change Biology. (14): 1-15.
16. Hodkinson, T.; Renvoize, S. 2001. Nomenclature of *Miscanthus x giganteus* (*Poaceae*). Kew Bulletin. 56: 759-760.
17. Huisman, S.; Kortleve, W. 1994. Mechanization of crop establishment, harvest and postharvest conservation of *Miscanthus sinensis Giganteus*. Industrial Crops and Products. (2): 289-297.
18. Iqbal, Y.; Gauder, M.; Claupein, W.; Graeff-Hönninger, S.; Lewandowski, I. 2015. Yield and quality development comparison between miscanthus and switchgrass over a period of 10 years. Energy. (89): 268-276.
19. Keymer, D.; Kent, A. 2014. Contribution of nitrogen fixation to first year *Miscanthus x giganteus*. GCB Bioenergy. (6): 577-586.
20. Larsen, S. U.; Jørgensen, U.; Kjeldsen, J. B.; Laerke, P. E. 2013. Long-term *Miscanthus* yields influenced by location, genotype, row distance, fertilization and harvest season. BioEnergy Research. 7(2): 620-635.
21. Lewandowski, I. 2003. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. Biomass and Bioenergy. (25): 335-361.
22. Lewandowski, I.; Kicherer, A. 1997. Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*. European Journal of Agronomy. (6): 163-77.
23. Lewandowski, I.; Clifton-Brown, J.; Scurlock, J.; Huisman, W. 2000. *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. Biomass and Bioenergy. (19): 209-227.
24. Lewandowski, I.; Clifton-Brown, J.; Andersson, B.; Basch, G.; Christian, D.; Jorgensen, U.; Jones, M.; Riche, A.; Schwarz, K.; Tayebi, K.; Teixeira, F. 2003. Environment and harvest time affects the combustion qualities of *Miscanthus* genotypes. Agronomy Journal. (95):1274-1280.
25. Meehan, P.; Finnan, J.; McDonnell, K. 2013. The effect of harvest date and harvest method on the combustion characteristics of *Miscanthus x giganteus*. GCB Bioenergy. (5): 487-496.
26. Płażek, A.; Dubert, F. 2010. Improvement of medium for *Miscanthus x giganteus*. Callus induction and plant regeneration. Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica. 52 (1): 105-110.
27. Pyter, R.; Heaton, E.; Dohleman, F.; Voigt, T.; Long, S. 2009. Agronomic experiences with *Miscanthus x giganteus* in Illinois, USA. In: Biofuels: Methods and protocols. Mielenz JR (Ed.). Human Press. NY. USA. p. 41-52.
28. Roncucci, N.; Nassi o Di Nasso, N.; Bonari, E.; Ragaglini, G. 2015. Influence of soil texture and crop management on the productivity of *Miscanthus* (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deu.) in the Mediterranean. GCB Bioenergy. (7): 998-1008.
29. Santis, G. 2005. Mapa de reconocimiento de suelos de la región de Biobío (Sector Norte). Memoria de Título. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 178 p.
30. Scally, L.; Hodkinson, T.; Jones, M. 2007. Origins and taxonomy of *Miscanthus*. In: Jones M., Walsh M. (Eds.). *Miscanthus* for energy and fibre. Earthscan. London. UK. p. 1-9.
31. Schwarz, H. 1993. *Miscanthus sinensis* 'giganteus' production on several sites in Austria. Biomass and Bioenergy. 5(6): 413-419.
32. Schwarz, K.; Murphy, D.; Schnug, E. 1994. Studies of the growth and yield of *Miscanthus x giganteus* in Germany. Aspects of Applied Biology. (40): 533-540.
33. Sixto, H.; Hernández, M.; Barrio, M.; Carrasco, J.; Cañellas, I. 2007. Plantaciones del género *Populus* para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentación (INIA). Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales. 16(3): 277-294.
34. Smith, J. 2009. Antecedentes *Miscanthus*. Documento Técnico N° Doc IIR-BC-INF-12-09. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Argentina. 6 p.
35. Steel, R.; Torrie, J. 1988. Bioestadística: Principios y procedimientos. México DF. México. McGraw-Hill/Interamericana. 622 p.
36. UNE-EN 14775. 2010. Norma Española Biocombustibles Sólidos. Método para la determinación del contenido de cenizas. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid. España. 10 p.

37. UNE-EN 14918. 2011. Norma Española Biocombustibles Sólidos. Determinación del poder calorífico. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid. España. 60 p.
38. Visser, P.; Pignatelli, V. 2001. Utilisation of *Miscanthus*. In: Jones M.B. Walsh M. (Eds.) *Miscanthus* for energy and fibre. Earthscan. London. UK. p. 109-154.
39. Wahid, R.; Frydendal Nielsen, S.; Moset Hernández, V.; James Ward, H.; Gislum, R.; Jorgensen, U.; Bjarne Moller, H. 2015. Methane production potential from *Miscanthus sp*: Effect of harvesting time, genotypes and plant fractions. Biosystems Engineering. (133): 71-80.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (Proyecto FONDEF B09i 1008).
El trabajo de la Ingeniera Forestal Cynthia Labraña y de los estudiantes de Ingeniería Forestal de la Universidad de Concepción María Eugenia Hinojosa y Oscar González.
La colaboración de los investigadores Dr. Salvatore Cosentino de la Universidad de Catania (Italia), Dr. Manuel Bao y Dr. Juan Luis Fernández de la Universidad de Santiago de Compostela (España), y del Laboratorio de Micropropagación de la Escuela Politécnica Superior de Lugo de la Universidad de Santiago de Compostela.