



AGENCIA NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
E INNOVACIÓN

Informe final publicable de proyecto

Cultivos lignocelulósicos en el Uruguay: potencial de rendimiento y sus impactos ambientales

Código de proyecto ANII: FMV_1_2017_1_135694

23/08/2021

SIRI PRIETO, Guillermo (Responsable Técnico - Científico)

BUSTAMANTE SILVEIRA, Héctor Mauricio (Investigador)

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE AGRONOMÍA (Institución Proponente)

Resumen del proyecto

Además de su potencial bioenergético, los cultivos perennes también pueden tener impactos positivos en las emisiones de gases de efecto invernadero, los ciclos biogeoquímicos en el suelo, el ciclo hidrológico y la calidad del suelo entre otros. Sin embargo, las respuestas a todos estos parámetros dependen de múltiples factores, incluida la selección de los cultivos y sus manejos agronómicos respectivos. Es por ello que se evaluaron 3 cultivos lignocelulosicos perennes: pasto elefante (EG), Cana común (GR) y switchgrass (SW) con diferentes manejos (respuesta al N, frecuencia de cortes, pastoreo. Estas evaluaciones se hicieron en tres estaciones experimentales del Uruguay (CRS, BR y EEMAC) en 5 años (2016-2020). El EG tuvo el mayor rendimiento en biomasa, seguido por SW y GR (23.7, 19.8, y 16.8 Mgha¹, respectivamente). Sin embargo esta especie tuvo el mayor contenido de agua en la biomasa (60%) Todas las especies aumentaron en promedio un 55% el rendimiento debido al N. El EG presento el mayor balance negativo de N-P-K en comparación con GR y SW. No hubo grandes diferencias en el COS ni del NT entre los cultivos y manejos, si bien SW presento mayor producción de raíces. Todos los cultivos evaluados presentaron emisiones de GEI muy bajas si los comparamos con cultivos anuales. Lo mismo ocurrió para las huellas hídricas, donde los valores resultados muy bajos comparados a cultivos anuales. También presentaron muy altos balances energéticos con valores de EROI muy altos. Los cultivos evaluados presentaron un elevado potencial de producción de biomasa. Por lo tanto estos cultivos perennes energéticos podrían ser una buena herramienta para mitigar el efecto de los GEI y disminuir los impactos negativos con respecto a la huella hídrica. Por otro lado, estos cultivos mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo degradados por el intensificación y/o expansión actual de la agricultura.

Ciencias Agrícolas / Agricultura, Silvicultura y Pesca / Agricultura / bioenergía

Palabras clave: cultivos lignocelulosicos / bioenergía / impacto ambiental /

Introducción

Debido a la constante demanda por la energía a nivel mundial, científicos de todo el mundo están motivados de identificar fuentes de energías alternativas a las fuentes no renovables (petróleo, gas natural, carbón). La biomasa celulósica puede ser una de ellas, y puede obtenerse tanto de residuos de otros procesos, como de cultivos lignocelulósicos realizados con el propósito de producir energía. (Lynd et al., 2003). Estos cultivos pueden convertirse en energía por varias vías como quema directa (combustión), quema con carbón, pirólisis y posterior uso de los derivados gaseosos, sólidos y líquidos, cortado y peletizado, hidrólisis y fermentación en alcoholes (McLaughlin et al., 1999). A nivel mundial, los más estudiados son el switchgrass (*Panicum virgatum* L.), miscantus (*Miscanthus x giganteus*) caña común (*Arundo donax* L.), pasto elefante (*Penisetum purpureum* L.) entre otros. Estos cultivos lignocelulósicos han sido propuestos como los cultivos más promisorios en Europa y América del Norte basados en sus bajos requerimientos de insumos por hectárea y su muy alta productividad. Switchgrass es una especie lignocelulósica C4 nativa del América del Norte que ha mostrado una excelente potencial como fuente de biomasa para la producción de etanol por técnicas de conversión o a través de la quema directa por combustión para la generación de electricidad entre muchas alternativas energéticas (McLaughlin and Kszos, 2005). Caña común es una especie C3 perenne estival nativa del este de Asia que ha sido naturalizada en el sureste europeo a través de los años. Es uno de las especies lignocelulósicas mas promisorias in términos de producción de biomasa debido a sus altos rendimientos en materia seca como a su alta adaptación a diferentes tipos de suelos y condiciones ambientales en el mediterráneo (Angelini et al., 2005; Lewandowski et al., 2003; Mariani et al., 2006). Pasto elefante es una especie lignocelulósica C4 nativa de africa que ha presentado muy altos valores de producción de biomasa aérea (Knoll et al., 2012). Sin embargo comparado con otras especies nombradas anteriormente ha sido menos estudiada. Estos cultivos lignocelulósicos pueden aprovechar suelos aptos y no aptos para cultivos alimentarios, generando una mayor eficiencia de conversión. Estos además son mucho más ventajosos que los cultivos anuales como el maíz en varios aspectos (Naik et al., 2010). Además, de ser más productivos (biomasa) que los cultivos anuales, tienen menores costos de producción, reducen la erosión de suelos, reducen la cantidad de insumos (fertilizantes, insecticidas, fungicidas), incrementan la calidad del agua, mejorar el hábitat, entre otros indicadores (Heaton et al., 2004; Lewandowski et al., 2000; Lewandowski et al., 2006). Además, La energía de los cultivos lignocelulósicos puede mitigar un acentuado efecto de gas invernadero a causa del secuestro neto del carbono atmosférico en el carbono orgánico del suelo (COS). La energía de estos cultivos pueden ser manejados potencialmente a favor del secuestro de carbono en el suelo. Por lo tanto, esto significa asegurar que los niveles de reserva del COS no se deterioran sistemáticamente con el tiempo. Zan et al. (2001) evaluaron la

capacidad de secuestrar carbono para maíz sembrado todos los años y Switchgrass bajo diferentes sistemas de producción, encontrando que si bien el maíz tuvo 1.2 mayor producción de biomasa aérea que Switchgrass, la producción de raíces de este último fue 4.6 veces mayor. Los autores sugieren que el potencial de secuestrar carbono a través de los cultivos energéticos como el Switchgrass es mucho mayor y eficiente comparado a la agricultura convencional. Por ello, es necesario valorar la cantidad de carbono que estos cultivos pueden dejar al suelo a través de las raíces y rastrojos aéreos dejados en la superficie del suelo en el largo plazo. Desde el punto de vista de la utilización de estos cultivos energéticos, muchos trabajos han mostrado que tanto el switchgrass como el pasto elefante pueden ser empleados para la producción animal o para bioenergía (Mohammed et al., 2014). Crecimientos tempranos en primavera-verano pueden ser cosechados vía forraje (pastoreo directo o ensilaje) y su posterior crecimiento verano-otoñal puede ser cosechado para bioenergía (Sanderson et al., 1999). Este doble propósito de los cultivos lignocelulósicos podría beneficiar a los productores generando una ganancia adicional con la producción animal (carne, leche, lana) y luego con la venta de la biomasa para la producción de energía a algunaplanta procesadora (biogás, iocombustible, quema directa, etc.). Pero por otro lado, la frecuencia y el momento de cosecha podrían estar afectando en el mediano plazo la producción de materia seca, su calidad así como también su longevidad. Muchas cosechas al año pueden reducir la persistencia de las plantas, incrementar la concentración de nutrientes en hoja y tallo y por lo tanto remover más nutrientes a la cosecha (Guretzky et al., 2011; Shastri et al., 2012). Uno o más cosechas por estación han mostrado producir óptimos rendimientos en la mayoría de los sistemas (Balasko et al., 1984). Estudios realizados con pasto elefante sugieren que una sola cosecha el inicio del invierno maximizan el rendimiento y la persistencia de la especie (Calhoun and Prine, 1985). Para caña común, una o dos cosechas al año han sido propuestas como una alternativa para una digestión anaeróbica por cosechas tempranas (biogás) y procesos termoquímicos (baja cenizas y humedad) para cosechas tardías (Dragoni et al., 2015). El momento de cosecha no solo puede afectar el rendimiento en biomasa sino también el contenido de humedad, así como también la concentración de nutrientes en switchgrass (Sanderson and Wolf, 1995). Por lo tanto, cosechar antes del invierno (inicio del periodo de heladas), se podrían obtener más rendimiento en biomasa pero con alto contenido de humedad y esto lleva al aumento de los costos por más transporte de agua, almacenamiento y secado. Por lo tanto, las estrategia de cosecha debe estar estratégicamente planeada para minimizar las pérdidas de rendimiento y optimizar el transporte de biomasa (Balan et al., 2012). Muchos estudios realizados en switchgrass han presentado que retrasar la cosecha hasta después del invierno reduce la concentración de N, P, K y otros nutrientes en tallos y hojas (Madakadze et al., 1998; Waramit et al., 2011; Yang et al., 2009). Además se ha visto que cuando el cultivo de switchgrass fue cosechado luego de varias heladas, la traslación de nutrientes a la base de los tallos, rizomas y las raíces ha sido maximizada (Mitchell et al., 2008). Similares resultados han sido encontrados con caña común cosechadas una o dos veces por estación de crecimiento (Dragoni et al., 2015; Dragoni et al., 2016). Sistemas de producción de biomasa para energía podrían incrementar la remoción de nutriente, por lo tanto podrían empobrecer los nutrientes del suelo a través del tiempo. Conocer la concentración y las tasas de remoción de nutrientes de los cultivos que se van en la cosecha es necesario para determinar la recomendación óptima y asegurar viabilidad económica y sostenible de los sistemas de energía basados en la biomasa.

Como es sabido, el nitrógeno es generalmente es el nutriente más importante y es el que necesita mayor energía para producirlo, por lo tanto es el de mayor costo energético y económico para la producción de cultivos gramíneos (Boerjesson, 1996). Por eso es fundamental conocer la respuesta que los cultivos lignocelulósicos presentan a este nutriente, además no solo por conocer el óptimo rendimiento con fertilización nitrogenada sino sobre la eficiencia de uso del nitrógeno. Guertsky et al. (2001) testeó N hasta los 225 kg ha⁻¹ en tres momentos de cosecha (julio, octubre y diciembre para latitudes del norte) y reportó respuestas positivas en biomasa a la fertilización nitrogenada. Los autores encontraron que con dos cosechas anuales (verano y luego en invierno), fue el más productivo, sin embargo altas cantidades de N fueron utilizados para maximizar este sistema. Por otro lado, Anderson et al. (1996) recomienda 56 kg N ha⁻¹ con cosechas en el otoño y 112 kg N ha⁻¹ in cosechas tan tempranas como la primavera para optimizar el rendimiento del switchgrass. En la bibliografía se encuentran resultados dispares de la respuesta de la caña comun 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, en la zona central de Italia. Por otro lado, Palmer et al. (2014) no obtuvieron respuesta o fue negativa, al fertilizar un cultivo de caña común con 134 kg ha⁻¹ N en la región de Carolina del Norte. Para el cultivo de pasto elefante, Knoll et al. (2013) y Sharma et al. (2012) encontraron altas respuestas en rendimiento biomasa al agregado de N.

Otro tema fundamental en la producción de bioenergía es su balance energético, tanto en energía neta producida por hectárea como en su eficiencia energética (medida como el coeficiente entre la energía generada y la energía consumida=EROI). Se ha estimado valores de EROI mayores a 6 para la producción de etanol a partir de biomasa (Berg, 2001). Muchos estudios sobre el rendimiento energético en el caso de Switchgrass han sido realizados en el pasado (Thurhollow y Perlack, 1991; McLaughlin, 1993; Anderson et al., 1996; Kim y Dale, 2004; Pimentel y Patzek, 2005; Schmer et al., 2008), fundamentalmente en EEUU, y han demostrado que presenta ventajas comparativas respecto a otros cultivos

energéticos. Los beneficios los cultivos energéticos incluyen la mitigación del cambio climático e incremento en la seguridad energética (Becker y Viers, 2007; Gany Smith, 2007; Mathews, 2007). Es por lo tanto fundamental para el éxito de proyectos de desarrollo de bioenergía tener una evaluación integral ex-ante de los beneficios y riesgos ambientales de estas propuestas (Halvorsen et al., 2011). El desarrollo de bioenergía puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Hill, 2009; IEA Bioenergy, 2011; Schmer et al., 2008; Solomon et al., 2007; Solomon y Luzadis, 2008; Tilman et al., 2009). La producción de biocombustibles puede modificar la producción vegetal, las emisiones de gases de efecto invernadero, los ciclos biogeoquímicos en el suelo, el ciclo hidrológico, y la biodiversidad, con efectos diferentes en diferentes lugares o regiones geográficas. Básicamente, la economía del Uruguay se basa en la exportación de materias primas o productos elaborados hacia países desarrollados. Los mercados internacionales han empezado a solicitar el cálculo de las emisiones ocurridas como consecuencia del proceso productivo completo, lo que se denomina huella de carbono (recuento de las emisiones de CO₂ que son liberadas a la atmósfera debido a bienes y servicios de consumo), huella hídrica (volumen de agua utilizada para producir bienes y servicios de consumo) entre otras. Es por ello que el país necesita conocer que impacto tienen estos cultivos lignocelulósicos sobre estas huellas con un enfoque de ciclo de vida. Debido a que Uruguay que está ubicado en una región subhúmeda, con abundantes precipitaciones y sin grandes limitaciones edáficas, resulta muy promisorio la introducción de estas especies lignocelulósicas para la producción de energía. Nula o muy poca información se posee concerniente al potencial de estos cultivos sobre rendimiento, calidad de la materia obtenida, balances de nutrientes y energéticos, huellas del carbono e hídrica.

Metodología/diseño del estudio

Experimento 1.

Los experimentos se ubicaron en Estaciones experimentales pertenecientes a la Facultad de Agronomía: EEMAC (Paysandú), CRS (Joanico, Canelones) y EEER (Cerro Largo), sobre tres localidades bien diferentes, como forma de ampliar el conocimiento de estos cultivos en suelos con limitantes en las propiedades físico-químicas (debido a historia agrícola), y donde estos cultivos ofrecerían las mayores ventajas ambientales de regeneración del suelo. Las regiones comprendidas por las Estaciones de la Facultad de Agronomía fueron elegidas debido a que hay suelos contrastantes y además porque al ser cultivos perennes, se tiene la seguridad de que se puedan seguir evaluando por muchos años más. Sembrar en otro tipo de lugar, tiene la inseguridad de poder seguirlos evaluando en el mediano plazo. Los suelos del CRS o EEMAC son representativos de los suelos dominantes del Uruguay, siendo brunosoles típicos, pero con gran historia agrícola. En la EEER, el suelo es liviano, pero igualmente tienen representatividad en esa zona. El proyecto se plantea trabajar con tres especies (caña común, pasto elefante y switchgrass) donde vamos a evaluar productividad (biomasa) y la calidad de la misma, evaluando además el impacto en materia seca de la fertilización nitrogenada (varias dosis) a las especies mencionadas anteriormente en las tres estaciones experimentales.

Experimento 2.

En la EEMAC además se evaluara el impacto de tres frecuencias de corte (1 o 2 cortes por año y un corte cada dos años) para las tres especies sobre el rendimiento y su efecto en las raíces y en la calidad del suelo.

Experimento 3.

En esta estación también se evaluó el switchgrass en la respuesta al nitrógeno sobre un ensayo donde antes del 2016 había tenido diferentes manejos de frecuencia de cortes. esta localidad

Experimento 4.

Se evaluó el SW con el objetivo de evaluar producción de carne con pastoreo directo. Estos tendrán el mismo diseño que los experimentos anteriores pero con parcelas de mayor dimensión debido al manejo con los animales. Se aplicarán fertilizantes para que este no sea limitante en productividad y no altere el objetivo de este estudio que es pastoreo. El experimento se inició con la preparación del suelo en el invierno-primavera del 2014 con un sistema de labranza convencional para luego en octubre sembrar el switchgrass (6 kg de semilla pura por ha⁻¹) sin fertilizante. Debido a que es un ensayo de evaluación de comportamiento animal, el área total fue de 1,2 ha, siendo la unidad experimental de 3.000 m²

En los primeros dos años, no se realizaron pastoreos debido al lento crecimiento del cultivo. Desde el 2016 y hasta el 2020

se vienen realizando pastoreos en la estación primavera-verano h

En el inicio del rebrote en la primavera se le aplicó 70 kg de nitrógeno por ha en forma de urea (setiembre). Se esperó una disponibilidad de aproximadamente 6.000 kg de MS

de forraje para el inicio del pastoreo todos los años que por lo general es entre el 15 /10 al 1/10. Se ha trabajado siempre con novillos Holando.

Determinaciones a realizar en todos los ensayos:

En la planta: Peso individual de tallos, N° de tallos por metro cuadrado, peso planta fresca y materia seca. Contenido de nitrógeno total, y de los principales macro nutrientes para su posterior estudio sobre la tasa de remoción por unidad de área. Se evaluará el % de macro y micro nutrientes en la biomasa. Estos elementos serán determinadas por Argon Plasma Emission Spectrometry (ICAP) (Soltanpour et al, 1982). A su vez se evaluará al final del año 3 (agosto 2020), la producción de biomasa radicular haciendo muestreos de suelos (20×30-cm) a diferentes profundidades usando el método de Bohm (1979) en los experimentos de corte de la EEMAC (Experimento 2).

En el suelo al final del ensayo (setiembre 2020): carbono orgánico del suelo. Se tomará una muestra compuesta de 10 sub-muestras por parcela a 0-20 cm profundidad. Las muestras serán secadas en estufa con aire forzado a 40° C y molidas con malla de 2 mm. El COS será determinado según Walkley y Black. Los resultados se expresarán en mg kg⁻¹ de suelo base seca y en Mg ha⁻¹, utilizando los datos de la densidad aparente para ello. La densidad aparente para el Experimento 2.

Se realizará un seguimiento a todos los valores energéticos introducidos en la implementación del cultivo, estimando según estándares internacionales aquellos insumos que no tengan una medida directa de su valor energético. En el momento de la cosecha anual se analizará la composición química, de manera de poder determinar el contenido energético.

Este trabajo realizó una estimación de la emisión de GEI para calcular una huella de carbono utilizando los criterios definidos por la Normas ISO 14064. La estimación de GEI tuvo en cuenta las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), y óxido nitroso (N₂O). El potencial de calentamiento global (GWP) fue 1, 25, y 265 para CO₂, CH₄ y N₂O, respectivamente. Las emisiones fueron expresadas por unidad de superficie (CO₂-eq ha⁻¹), y por unidades de poder calorífico de la biomasa producida (expresado en CO₂-eq GJ⁻¹). El inventario para el cálculo de las emisiones comprendió las fases de preparación de campo, siembra, post-siembra, cosecha y transporte a una planta de producción de bioenergía ubicada a 100 km.

Se realizó también la huella del agua (HA) siguiendo la metodología de propuesta por Hoekstra et al. (2011). La HA es un indicador por producto, es el resultado de la suma de las tres tipos de agua (azul, verde y gris) (Hoekstra et al., 2011) usando la ecuación: HA (m³) = azul + verde + gris donde el agua azul es el volumen de agua consumido por riego, la verde el agua evapotranspirada por los cultivos y la gris es el volumen de agua equivalente a diluir la emisión de contaminantes hasta la concentración permitida por la ley para la protección del agua. Para nuestros experimentos donde no se aplicó agua suplementaria, el agua azul fue 0.

El diseño experimental para todos los ensayos será de bloques al azar arreglo factorial con tres o cuatro repeticiones. Las parcelas serán de 3.5 x 2.5 m. El control de malezas, plagas y enfermedades se realizará de acuerdo a las necesidades que presente.

Los datos obtenidos en las determinaciones serán sometidos a análisis de varianza a través del paquete estadístico SAS

Resultados, análisis y discusión

1.1 Experimento cultivos lignocelulosicos y dosis de N (EEBR, CRS y EEMAC)

Se encontraron interacciones significativas entre localidades*especies*dosis de N aplicados. Promediando entre localidades*dosis N*años de evaluación, pasto elefante (EG) tuvo el mayor rendimiento de biomasa seca, seguido de switchgrass (SW) y Caña común (GR) (23.7, 19.8, y 16.8 Mgha¹, respectivamente). Hubo gran respuesta al agregado de N a los cultivos lignocelulosicos, variando entre cultivos, años y localidades. El impacto mayor al agregado de N en biomasa fue en la estación CRS (72%), seguido por EEMAC (50%) y EEBR (46%). Se encontraron grandes diferencias en el contenido de agua en la biomasa, presentado el EG los mayores valores (60%), seguido de GR con 40% y SW con 20%. Los máximos

rendimientos se obtuvieron con la dosis de 100 kgN en EEBR y EEMAC, siendo la dosis de 150 kg de N en el CRS. Grandes diferencias en NUE fueron observadas entre localidades, especies, años y dosis de N aplicadas. Promediando localidades y años, las mayores respuestas al agregado de N según especie fueron con EG seguidos de GR y SW (86, 54 y 42 kg biomasa kgN⁻¹ agregado, respectivamente). Se encontraron interacciones con respecto a la EUN según localidad y especie, En la estación del CRS, GR y EG tuvieron las mayores EUN (99 y 74 kg biomasa kgN⁻¹ agregado), pero en cambio en la EEMAC se obtuvieron las mayores EUN con EG seguido por SW y luego GR (80, 65 y 22 kg biomasa kgN⁻¹ agregado). Como era de esperar, los años con mayores precipitaciones estivales se obtuvieron los mayores NUE, llegando a alcanzar valores máximos de 500 y 138 kg biomasa kgN⁻¹ agregado con EG en BR y CRS, respectivamente. EG tuvo los mayores valores en concentración de P y K (1.41, and 19.0 gkg⁻¹, respectivamente), siendo el GR el que presentó los mayores valores en concentración de N (4.3 gkg⁻¹). Por otro lado, SW presentó los valores más bajos en concentración de N, P y K (3.2, 0.42, and 1.5 gkg⁻¹, respectivamente). Se encontraron grandes diferencias entre especies en la remoción de N-P-K. EG tuvo los mayores valores de remoción de nutrientes acumulados en estos años de evaluación (475, 165 y 2250 kg ha⁻¹ para N-P-K, respectivamente) mientras que SW tuvo los valores de remoción totales más bajos (315, 40 y 150 kg ha⁻¹ para N-P-K, respectivamente).

No se observaron grandes diferencias con respecto al carbono orgánico del suelo (COS) en los primeros 20-cm de profundidad entre las localidades evaluadas, siendo 2.38 mgkg⁻¹ para la localidad BR, 2.19 mgkg⁻¹ para CRS y 2.15 mgkg⁻¹ para la EEMAC. Luego de los años de evaluación, hubo diferencias en lo que respecta a cultivos lignocelulosicos a favor de EG solo en la localidad de CRS, no presentando diferencias significativas entre especies en EEBR y EEMAC. Se encontró efecto de las diferentes dosis de N sobre el COS en la localidad de CRS y EEBR, no presentando diferencias significativas en la EEMAC. En el CRS, a dosis mayores de N hubo un incremento lineal en el COS (1.82, 2.05, 2.10 y 2.21 mgkg⁻¹ para dosis de N 0, 50, 100 y 150, respectivamente). En la localidad de EEBR, se encontró la misma relación de incremento del COS con incremento de la dosis de N (2.18, 2.31, 2.48 y 2.53 mgkg⁻¹ para dosis de N 0, 50, 100 y 150, respectivamente).

Resultados similares fueron encontrados con respecto al nitrógeno total del suelo (NT) en la profundidad de 0-20-cm, donde no se encontraron diferencias entre localidades. Por otro lado, al igual que sucedió con el COS, solo hubo efecto del cultivo EG en la localidad de CRS, donde el NT (0.24 mgkg⁻¹) fue un 5 y 8% superior que en GR y SW, respectivamente.

Se encontró efecto de las diferentes dosis de N sobre el NT solo en la localidad de CRS, no presentando diferencias significativas en la EEMAC y EEBR. En el CRS, a dosis mayores de N hubo un incremento lineal en el NT (0.22, 0.23, 0.24 y 0.25 mgkg⁻¹ para dosis de N 0, 50, 100 y 150, respectivamente).

Desde el punto de vista del balance energético (energía producida sobre la energía consumida por el proceso), el EG presentó los mejores valores, promediando entre las localidades y las dosis de N en 22.8 MJMj⁻¹, seguido del SW con 20.7 MJMj⁻¹ y GR con 17.0 MJMj⁻¹. A su vez, en la medida que las dosis de N fueron incrementándose, hubo una disminución en el EROI.

Las emisiones de GEI emitidos por los diferentes cultivos y sus dosis de N muestran muy bajas emisiones en el promedio especies, dosis de N y localidades (72.1 kg CO₂-eqMg⁻¹). Se encontraron diferencias entre las localidades, donde la localidad del CRS presentó las menores emisiones (54.9 kg CO₂-eqMg⁻¹) seguido de la EEMAC (68.7 kg CO₂-eqMg⁻¹) y luego EEBR (92.7 kg CO₂-eqMg⁻¹). Por otro lado, dentro de la comparación entre los cultivos analizados, EG presentó las menores emisiones (57.2 kg CO₂-eqMg⁻¹) seguido de SW (72.1 kg CO₂-eqMg⁻¹) y luego GR (87.2 kg CO₂-eqMg⁻¹). Como fuera discutido anteriormente, la fertilización nitrogenada tuvo impacto en la biomasa producida, pero esta mejora en la eficiencia de uso del N no fue en la misma relación que tiene el aumento de la emisión (kg CO₂ por kg de N agregado). Por lo tanto, a dosis mayores de N, el incremento de las emisiones de CO₂-eq fue aumentando. Promediando las especies, años y las localidades, la dosis 0 N tuvo una emisión de 58.6 kg CO₂-eq Mg⁻¹ seguido de 50, 100 y 150-200 kg N ha⁻¹ (66.9, 73.7, y 89.0 kg CO₂-eq Mg⁻¹, respectivamente). Con respecto a la estimación de la huella del agua, el consumo de agua total, el promedio de las localidad, especies y manejos del N presentó valores muy bajos (13.000 m³ha⁻¹yr⁻¹), debido principalmente a la productividad de estos cultivos lignocelulosicos y a baja utilización de insumos que requiere los mismos. Se encontraron diferencias entre las localidades, donde la localidad del CRS presentó los menores consumos de agua total por kg de biomasa producida (576 m³Mg⁻¹) seguido de la EEMAC (629 m³Mg⁻¹) y luego EEBR (957 m³Mg⁻¹). Por otro lado, dentro de la comparación entre los cultivos analizados, al igual que sucedió con emisión de GEI, EG presentó los menores consumos de agua total (573 m³Mg⁻¹) seguido de SW (704 m³Mg⁻¹) y luego GR (882 m³Mg⁻¹). Contrariamente a lo sucedido con la huella de carbono (GEI), la fertilización nitrogenada, que tuvo impacto positivo en la biomasa producida, hizo disminuir el consumo de agua total por Mg de biomasa producida (m³Mg⁻¹ de biomasa). Por lo tanto, a dosis mayores de N, hubo una disminución en el agua consumida por biomasa producida. La dosis 0 N tuvo un consumo de agua de 947 m³Mg⁻¹ seguido de 50, 100 y 150-200 kgNha⁻¹ (696, 644 y 593 m³Mg⁻¹, respectivamente).

1.2. Experimento cultivos lignocelulósicos por frecuencia de cosecha (EEMAC)

En el experimento de evaluación de las tres especies lignocelulósicas por la frecuencia de cosecha (un corte cada dos años, un corte por año y doble corte por año) que se realizó en la EEMAC, un corte por año (promediado entre los cultivos lignocelulósicos) fue el mejor tratamiento en rendimiento de biomasa seca, seguido el doble corte anual y finalmente un corte cada dos años (29.26, 26.44 y 15.06 Mgha-1y-1). No se encontraron interacciones entre los cultivos evaluados y la frecuencia de cortes. El impacto que tuvieron estos cultivos y el manejo de la cosecha se vio reflejada en la producción de raíces en los primeros 60 cm de profundidad. En los primeros 20 cm del suelo, hubo un efecto significativo en la producción de raíces según sea el cultivo evaluado. EG y SW presentaron los valores mayores en raíces base seca (20.01 y 19.54 Mgha-1) siendo diferente significativamente del GR (14.89 Mg ha-1). A esta profundidad de muestreo, no se encontró ningún efecto de la frecuencia de corte sobre la producción de raíces. En el estrato de 20-40 cm de profundidad, se encontró efecto de las especies pero también efecto de la frecuencia de corte. Switchgrass presentó los mayores valores de producción de raíces (9.26 Mgha-1), siendo un 71 y 136% superior que GR y PE, respectivamente. La frecuencia de corte también impactó en la producción de raíces en este estrato, siendo la doble cosecha anual y el corte por año los mejores tratamientos en comparación con un corte cada dos años. En el estrato inferior (40-60-cm profundidad), también se encontró efecto de los cultivos y la frecuencia de cortes en la producción de raíces. Switchgrass presentó los mayores valores de producción de raíces (5.31 Mgha-1), siendo 155 y 178% superior que GR y PE, respectivamente. La frecuencia de corte también impactó en la producción de raíces en este estrato, siendo la doble cosecha anual el mejor tratamiento (4.12 Mg ha-1) seguido de un corte por año y el un corte cada dos años. Con respecto al balance energético, con los tratamientos un corte por año y doble anual no se encontraron diferencias entre los cultivos evaluados (media de 22 MJMj-1), pero con un corte/dos años, SW presentó los menores valores de EROI (10.6 MJMj-1).

Se encontraron diferencias en las emisiones de GEI emitidos por los diferentes cultivos y la frecuencia de cortes. Pasto elefante y GR presentaron las menores emisiones (59.4 y 60.6 kgCO₂-eqMg-1, respectivamente) seguido de SW (94.5 kgCO₂-eqMg-1). Por otro lado, la frecuencia de un corte por año presentó las menores emisiones (50.2 CO₂-eqMg-1) seguida de doble corte anual (55.8 CO₂-eqMg-1) y un corte cada dos años (108.5 CO₂-eqMg-1).

Al igual que sucedió con emisión de GEI, GR y EG presentaron los menores consumos de agua total (501 y 490 m³Mg-1) seguido de SW (666 m³Mg-1). Por otro lado, la frecuencia de corte también afectó el consumo de agua total por Mg de biomasa producida (m³Mg-1 de biomasa). Un corte por año presentó los menores valores de agua total (438 m³Mg-1) seguido de doble corte y por último un corte cada dos años (487 y 948 m³Mg-1, respectivamente).

1.3. Experimento Switchgrass según dosis de N e historia de frecuencia de cortes (EEMAC)

Se obtuvieron diferencias según historia de frecuencia de cortes realizadas desde el 2009 al 2016, siendo superior el tratamiento un corte por año frente al doble corte anual (20.71 vs. 18.86 Mgha-1y-1). Por otro lado, el cultivo de SW presentó una gran respuesta al agregado de 100 kg Nha-1, siendo esta respuesta más contundente en el que se había se había realizado doble corte anual (53% incremento) que sobre un corte por año (45%).

Como fuera mencionado anteriormente, la fertilización nitrogenada tuvo impacto en la biomasa producida, pero esta mejora no fue en la misma relación que tiene el aumento de la emisión (kg CO₂ por kg de N agregado). Por lo tanto, a dosis mayores de N (0 vs, 100 kgha-1), el incremento de las emisiones de CO₂-eq aumento. La dosis 0 N tuvo una emisión de 50.0 kgCO₂-eq Mg-1 y la de 100 kg N de 61.6 kgCO₂-eq Mg-1. Con respecto a la estimación de la huella del agua, el consumo de agua total, la fertilización nitrogenada, que tuvo impacto positivo en la biomasa producida, hizo disminuir el consumo de agua total por Mg de biomasa producida (m³ Mg-1 de biomasa). Por lo tanto, a dosis mayores de N, hubo una disminución en el agua consumida por biomasa producida (538 vs. 805 m³Mg-1, para 100 y 0 kgN, respectivamente).

1.4. Experimento Switchgrass en pastoreo (EEMAC)

El peso promedio de los animales ha sido en estos años de 280 kg. Se realizaron varios pastoreos (principalmente 3 en momentos) con un tiempo estimado de unos 25 días cada uno con luego tiempo de descanso. Las cargas han fluctuado entre 6 y 10 por ha según la estación del año. Los pastoreos de octubre-noviembre (el primero) han llegado a ganancias diarias por animal entre 900 y 1600 g. En febrero- marzo las ganancias diarias han sido menores (100-500 g) debido principalmente a la calidad del forraje consumido (proteína cruda menor a 10%). Considerando los pastoreos realizados en

el periodo 2017-2020 (60-80 días), las producciones de carne obtenidas fueron en promedio de unos 475 kg ha⁻¹, con un máximo de 550 kg ha⁻¹.

Conclusiones y recomendaciones

Se agrega discusión en este ítem, ya que quedo desproporcionado las palabras entre resultados, análisis y discusión con este ítem (conclusiones y recomendaciones)

2.1 Experimento cultivos lignocelulosicos y dosis de N (EEBR, CRS y EEMAC)

Determinar cuál de los cultivos lignocelulosicos y su interacción con la fertilización nitrogenada es el que produce mayor biomasa y con calidad energética es de altísima prioridad. Por lo tanto, es fundamental identificar estos cultivos y sus potenciales rendimientos en diferentes localidades, sin perder de vista los procesos que se desarrollan cuando estos están en producción (impactos ambientales, eficiencias, etc.). EG, GR y SW exhibieron un gran potencial para la producción de biomasa para nuestras condiciones. EG tuvo los mayores rendimientos en biomasa seca. Investigaciones realizadas con estos cultivos por Siri-Prieto et al. (2017) en Uruguay mostraron resultados muy similares a los obtenidos en este trabajo. Palmer et al. (2014), en condiciones ecológicas parecidas, también reporto similares resultados. Pasto elefante tuvo los mayores contenidos de agua en la biomasa, valores muy similares reportados en otras investigaciones (Siri-Prieto et al., 2017, 2020). Switchgrass al contrario fue el que presento los valores mas bajos. Por otro lado, el impacto positivo que tuvo la aplicación de N que aumento la biomasa en el entorno del 60% son comparables a trabajos realizados en SW (Muir et al., 2001; Allison et al., 2012; Pedrosa et al., 2013), GR (Angelini et al., 2005; Kering et al., 2012), and EG (Knoll et al., 2013). Estas altas respuestas al agregado de N podría ser debido a altas tasas de remoción del suelo, y por consiguiente un agotamiento del suelo a través del tiempo (Knoll et al., 2012). Las altas tasas de remoción de nutrientes en EG, muy similares a reportes realizados por Siri-Prieto et al. (2020), siendo el único cultivo que tuvo balances N-P-K muy negativos. Como resultado de la falta de fertilización con K a lo largo de este estudio, K fue el nutriente con mayores balances negativos. En consecuencia, un enorme balance negativo de K se produjo para las tres especies de gramíneas. EG con -2250 kg K ha⁻¹ durante los 5 años de estudio fue comparable a lo informado por Knoll et al. (2012) trabajando en el sureste de USA. EG en el CRS tuvo mayores contenidos de carbono orgánico del suelo (COS) (0-20-cm) luego de estos años de evaluación. Similares resultados se han encontrado en trabajos realizados por Siri-Prieto et al., (2021). Knoll et al. (2013) trabajando con EG encontró incremento en el SOC entre 2.51 y

3.35 Mg ha⁻¹ luego de 4 años, concluyendo que es un gran cultivo para secuestrar C. Los resultados obtenidos con el cultivo de GR, van en la misma línea a los trabajos realizados por Monti y Zegada-Lizarazu (2016), que con altas tasas de fertilización con N (160 kg N ha⁻¹) resultó en incrementos en COS, especialmente en las capas superficiales del suelo.

Hay dos factores principales para mejorar el rendimiento energético que son la reducción de los insumos energéticos (EI) y/o el aumento del equivalente energético producido (EP)-incorporado en la biomasa cosechada (Swanton et al., 1996). Por lo tanto, el objetivo fue mejorar el rendimiento energético en el cociente (EP/EI) llamado EROI. Por consiguiente, al tener manejos casi iguales todos los cultivos, y solo se diferenciaron por el uso del N aplicado, el EROI se incremento por mayores rendimientos en biomasa y disminuyó por mayores aplicaciones de N. Sin embargo, en el balance total energético (Mj salidas – Mj insumos) se vio incrementada por incremento en la biomasa por usar dosis crecientes de N. Todos los cultivos evaluados presentaron emisiones de GEI muy bajos si los comparamos con cultivos anuales, por lo que sería recomendable implementar su producción en Uruguay. Lo mismo ocurrió para las huellas hídricas, donde los valores resultados muy bajos comparados a cultivos anuales con destino energético. Todos los cultivos tuvieron resultados similares a otros reportes, donde el agua verde y la gris representan en el entorno de 60 y 40% del consumo de agua total, respectivamente. La diferencia entre nuestros resultados y los valores reportados en otros trabajos es probablemente a la no cuantificación del agua azul al ser nuestras evaluaciones en secano (sin riego). Estos 3 cultivos evaluados presentaron un elevado potencial de producción de biomasa en las condiciones de clima y suelo del Uruguay. Estas características lo definen como una opción interesante para integrarlo a sistemas agrícolas del Uruguay que actualmente presenten suelos degradados por una historia de agricultura continua muy intensiva. Por lo tanto estos cultivos perennes energéticos podrían ser una buena herramienta para mitigar el efecto de los GEI y disminuir los impactos negativos con respecto a la huella hídrica. Por otro lado, estos cultivos mejorar las propiedades físicas y químicas (Zan et al., 2001; Liebig et al., 2008; Anderson-Teixeira et al., 2009; Monti et al., 2012) de suelos degradados por el intensificación y/o expansión actual de la agricultura.

2.2. Experimento cultivos lignocelulosicos por frecuencia de cosecha (EEMAC)

Determinar cuál de los cultivos lignocelulosicos y su interacción con la frecuencia de cosecha es la que produce las mayores cantidades de biomasa, con calidad energética, y con los menores impactos ambientales es de suma importancia. El GR, EG y SW presentaron muy buenos potenciales de producción de biomasa seca. El tratamiento un corte por año presento los mejores rendimientos en biomasa. Para EG, no se encontraron diferencias entre un corte por año y doble corte anual. Trabajos realizados por Woodard y Prine (1991) presentaron resultados distintos, donde la biomasa de EG en un sistema de doble cosecha se redujo en un 19% en comparación con un solo corte. Maximizar la productividad en el corto plazo (cortes repetidos) puede agotar las reservas del suelo y reducir la vida útil de la GR y EG (Balasko et al., 1984, Woodard y Prine, 1991). Rendimientos acumulados de biomasa para el SW fueron mayores para un corte que para dos cortes por año. Mohammed et al. (2014) presento valores similares a los obtenidos en este estudio. Switchgrass presento los mayores valores de producción de raíces en todo el perfil del suelo. Varios estudios confirman que el sistema de enraizamiento se extienden a más de 1 m de profundidad, también puede promover la acumulación de reservas de COS profundas en suelos (Garten and Wullschleger, 2000; Kumar et al., 2019). Como era de esperar, los EROI mas altos se obtuvieron con una o doble cosecha anual debido al rendimiento (biomasa) en esos manejos. Todos los cultivos evaluados presentaron emisiones de GEI muy bajos y valores también bajos con respecto a los consumos de agua total, si bien hubo algunas diferencias a favor de los tratamientos de un corte o doble corte por año con respecto a un corte cada dos años.

2.3. Experimento Switchgrass según dosis de N e historia de frecuencia de cortes (EEMAC)

Como se observo en el experimento 2, el switchgrass tuvo mejores resultados en biomasa cosechada con un corte anual que el doble anual. En este experimento se evaluó el efecto acumulado en el tiempo de estos dos manejos diferenciados hasta el 2015 con o sin agregado de N. A la fecha, todavía se mantiene una diferencia del manejo un corte sobre dos, si bien los rendimientos a través de los años se vienen igualando. Como se observo en el experimento 1, hubo una gran respuesta al N medido en biomasa extra producida, produciendo un impacto negativo en la emisión (kg CO₂ por kg de N agregado). Por el contrario, en lo referente a la huella hídrica, el impacto de mayores dosis de N trajo una disminución del consumo de agua total.

2.4. Experimento Switchgrass en pastoreo (EEMAC)

Se obtuvieron muy buenos resultados en producción de carne en estos últimos 4 años de evaluación (475 kg_{ha}⁻¹) con el pastoreo directo del cultivo de switchgrass. Considerando los bajos costos que esta especie requiere, podría ser una alternativa para la producción de carne, debido a los buenos resultados físicos obtenidos, resultando en potenciales márgenes económicos positivos. Obviamente que se necesitan más estudios para ir ajustando y conociendo el mejor manejo de la especie para la producción de forraje, pero estos resultados son muy promisorios. La idea de implementar este tipo de manejo, nos parece muy importante por una razón fundamentalmente. A la fecha, no hay ningún mercado que demande este tipo de biomasa para la producción de energía, cualquiera de ellas (quema, biogás, etanol, etc.). Por lo tanto consideramos que este pastoreo del switchgrass puede ser una entrada al sistema agropecuario uruguayo, para que las empresas y productores rurales vayan conociendo el cultivo y su manejo. Si en el futuro, llega a haber mercado para los productos bioenergéticos, estas empresas/productores podrán optar por el sistema (energía o forraje) que les brinde más rentabilidad económica.

3. Conclusiones y recomendaciones generales

Después de estos 5 años de evaluación, se puede sugerir que los tres cultivos tienen un potencial notable como fuentes energéticas en las tres zonas evaluadas en el Uruguay, gracias a su alta capacidad de adaptación y excelentes rendimientos en biomasa. En términos generales, el pasto elefante exhibió la mayor producción de biomasa y energía por unidad de superficie cultivada. Lo negativo de estos cultivos, es su mayor contenido de humedad, que puede aumentar los costos de transporte y las pérdidas de almacenamiento. Además este cultivo presento un balance muy negativo de nutrientes (N-P-K), aspecto a considerar en el futuro. El cultivo de switchgrass al sembrarse con semillas, a lo contrario a los otros dos cultivos que se plantan con estolones, presenta también una facilidad de implantación más económica y rápida que los otros dos. Esta especie además, es la que presenta menores contenido de agua y nutrientes en la biomasa, por lo tanto es de mayor calidad para la industria energética. Esta investigación ha generado información original de

utilidad para todos los actores relacionados a la producción y comercialización de biomasa, aportando información importante para lograr una intensificación ecológica y/o sostenible de los sistemas bioenergéticos del país. Es relevante que la información generada sea fácilmente comprendida, y pueda ser empleada por los tomadores de decisión, por ejemplo, consultores, técnicos, políticos y agentes de los ministerios, ANCAP, MIEM, UTE, entre otros.

Por último, no hay que olvidar que las posibles zonas o regiones del Uruguay en las que puedan instalarse estos cultivos energéticos, deben de tener la capacidad de resiliencia, para volver a ser sistemas agroalimentarios y con gran potencial de producción, ya que seguramente, en un futuro no muy lejano, la energía no se producirá por vía fotosintética. Por tanto, el camino de fijación de energía por las plantas seguirá teniendo como fin específico, la 'fabricación' de alimentos y no la energética.

Referencias bibliográficas

- Anderson BE, Moore KJ (1996) CSSA Special Pub. No 30. Crop Science Society of America Madison, WI.
- Angelini LG, Ceccarini L, Nasso N, Bonari E (2009) Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus × giganteus* in a long-term field experiment in Central Italy: Analysis of productive characteristics and energy balance. *Biomass Bioenergy* 33:635-643.
- Angelini GL, 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. *Eur J Agron* 22:375-389.
- Balan V, Kumar S, Bals B, Chundawat S, Jin M, Dale B (2012). Biochemical and thermochemical conversion of switchgrass to biofuels. *Switchgrass In: Monti, A. (Ed.), A Valuable Biomass Crop for Energy. Springer-Verlag, London, pp 153–185.*
- Balasko JA, Burner DM, Thayne WV (1984) Yield and quality of switchgrass grown without soil amendments. *Agron J.* 76:204-208.
- Becker DR, Viers J (2007) Matching the utilization of forest fuel reduction by-product to community development opportunities. *People, fire, and forests*, 157- 170.
- Boerjesson P (1996) Energy analysis of biomass production and transportation. *Biomass and Bioenergy* 11:305-318.
- Calhoun DS, Prine GM (1985) Response of elephantgrass to harvest interval and method of fertilization in the colder subtropics, *Soil Crop Sci Soc Fla Proc* 44:111-115.
- Dragoni F, Nasso N, Tozzini C, Bonari E, Ragaglini G (2016) Nutrient concentrations and uptakes in giant reed (*Arundo donax* L.) as affected by harvest time and frequency. *Bioenergy Res* 9:671-681.
- Dragoni F, Ragaglini G, Nasso N, Tozzini C, Bonari E (2015) Aboveground yield and biomass quality of giant reed (*Arundo donax* L.) as affected by harvest time and frequency. *Bioenergy Res* 8(3):1321-1331.
- Gan J, Smith CT (2007) Co-benefits of utilizing logging residues for bioenergy production: The case for East Texas, USA. *Biomass and Bioenergy* 31(9) 623- 630.
- Guretzky JA, Biermacher JT, Cook BJ, Kering MK, Mosali J (2011) Switchgrass for forage and bioenergy: harvest and nitrogen rate effects on biomass yields and nutrient composition. *Plant Soil* 339:69–81.
- Halvorsen KE, Barnes JR, Solomon BD (2009) Upper Midwestern USA ethanol potential from cellulosic materials. *Society and Natural Resources* 22(10) 931-938.
- 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* 27:21–30.
- Hill J, Polasky S, Nelson E, Tilman D, Huo H, Ludwig L, Bonta D (2009) Climate change and health costs of air emissions from biofuels and gasoline. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(6): 2077-2082.
- Knoll JE, Anderson WF, Strickland TC, Hubbard RK, Malik R (2012) Low-input production of biomass from perennial grasses in the coastal plain of Georgia, USA, *Bioenergy Res* 5(1):206-214.
- Knoll JE, Johnson JM, Huang P, Dewey R, William L, Anderson F (2015) Effects of delayed winter harvest on biomass yield and quality of napiergrass and energycane. *Biomass Bioenergy* 80:330-337.
- Lewandowski I, Clifton-Brown JC, Scurlock JMO, Huisman W (2000) *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy* 19(4):20–27.
- Lewandowski I, Schmidt, U (2006) Nitrogen, energy and land use efficiencies of *Miscanthus*, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach. *Agriculture Ecosystems & Environment* 112:335–46.
- Lewandowski I, Scurlock JMO, Lindvall E, Christou M (2003) The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass Bioenergy* 25:335-361.
- Lynd LR, Lave L, Greene N (2003) Cellulosic ethanol fact sheet. National Commission on Energy Policy Forum: The Future of Biomass and Transportation. Washington, DC In: www.energycommission.org/files/finalReport/IV.4.c%20-20Cellulosic%20Ethanol%20Fact%20Sheet.pdf.
- Madakadze IC, Coulman BE, McElroy AR, Stewart KA, Smith DL (1998) Evaluation of selected warm-season grasses for biomass production in areas with a short growing season. *Bioresour Technol* 65:1-12.
- Mariani C, Cabrini R, Danin A, Piffanelli P, Fricano A, Gomasasca, S (2010) Origin, diffusion and reproduction of the giant reed (*Arundo donax* L.): a promising weedy energy crop. *Ann Appl Biol* 157(2):191-202.
- McLaughlin J, Bouton D, Conger B, Ocumpaugh W, Parrish D, Taliaferro C, Vogel K, Wullschlegel S (1999) Developing Switchgrass as a Bioenergy Crop. J. Janick (ed.), ASHS Press, Alexandria, VA.
- McLaughlin SB (1993) New switchgrass biofuels research program for the southeast. In *Pruc. 1992 Annual Automotive.Technol. Dev. Conhactor's Coordinating Meeting, 2-5 November 1992 Dearborn MI pp. 111-5.*

- McLaughlin SB, Kszos LA (2005) Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States. *Biomass Bioenergy* 28:515-535.
- Mitchell R, Vogel KP, Sarath G (2008) Managing and enhancing switchgrass as a bioenergy feedstock. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining-Biofpr* 2:530-539.
- Naik SN, Goud VV, Rout PK, Dalai AK (2010) Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renew Sust Energy Rev* 14:578-597.
- Sanderson MA, Reed RL, Ocumpaugh WR, Hussey MA, Van Esbroeck G, Read JC, Tischler CR, Hons FM (1999) Switchgrass cultivars and germplasm for biomass feedstock production in Texas. *Bioresour Technol* 67:209-219.
- Sanderson MA (2000) Cutting management of native warm-season perennial grasses: Morphological and physiological responses. In: *Native Warm- Season Grasses: Research Trends and Issues* pp 133-146.
- Sanderson MA, Read JC, Reed RL (1999) Harvest management of switchgrass for biomass feedstock and forage production. *Agron J* 91:5-10.
- Sanderson MA, Wolf DD (1995) Switchgrass biomass composition during morphological development in diverse environments. *Crop Sci* 35:1432-1438.
- Schmer MR, Vogel KP, Mitchell RB, Perrin RK (2008) Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. *Proc Natl Acad Sci USA* 105:464-69.
- Shastri YN, Hansen AC, Rodríguez LF, Ting KC (2012) Switchgrass practical issues in developing a fuel crop. *CAB Reviews* 7:1-14.
- Solomon BD (2010) Biofuels and sustainability. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1185(1):119-134.
- Tilman D, Socolow R, Foley JA, Hill J, Larson E, Lynd L, Williams R (2009) Beneficial biofuels-the food, energy, and environment trilemma. *Science* 325 270.
- Waramit N, Moore KJ, Heggenstaller AH (2011) Composition of native warm-season grasses for bioenergy production in response to nitrogen fertilization rate and harvest date. *Agron J* 103:655-662.
- Yang J, Worley E, Wang M, Lahner B, Salt DE, Saha M, Udvardi M (2009) Natural variation for nutrient use and remobilization efficiencies in switchgrass. *Bioenergy Research* 2 257-266

Licenciamiento

Reconocimiento 4.0 Internacional. (CC BY)