

Factibilidad técnica y financiera del cultivo de *Pennisetum purpureum* (Schumach) para la producción de biomasa con el fin de generación eléctrica

Technical and financial feasibility of growing *Pennisetum purpureum* (Schumach) for production of biomass for electric generation

Gregory Guevara¹ • Dagoberto Arias²  • Juan Carlos Valverde²  • Rooel Campos³ 

Abstract

Pennisetum purpureum is a fast-growing herbaceous species with calorimetric properties which gives it ideal conditions to be implemented in biomass projects of electricity generation for Costa Rica. The present study assessed the technical and financial feasibility of the species within conditions of a high-density plantation; for which a pilot plantation of 12 hectares was established in Guanacaste, Costa Rica and was managed with a production cycle of 159 days, limiting its running to applications of three nutritional doses of nitrogen (85, 131 and 17 kg ha⁻¹); after harvesting, the accumulated biomass, the caloric power, and its financial viability were evaluated to be implemented in a boiler of 2 MW of power. The results showed a harvest of: 85 to 110 ton ha⁻¹ of dry biomass and found the highest values in the treatment that used higher doses of nitrogen; it was also found that the dry biomass of the species is just 24 % of the total biomass, but with a caloric power greater than 3800 cal g⁻¹, which showed the actual electrical potential to be 1.33 MWh ton⁻¹ (considering a boiler with an efficiency of 30 %), enough for a plantation of 200 ha with two harvest cycles per year and at a distance of less than 45 km from the plant to generate electricity with a financially acceptable profitability; the financial analysis showed this type of project is viable as long as the production of biomass is not less than 120 ton ha⁻¹, the cost of the kilowatt time is lower 0.10 USD and the plantations are not more than 45 km away from the plant.

Key words: Herbaceous species, bioenergy, technical analyze, financial analyze, dendroenergetic plantation.

1. Director de Proyectos, NETAFIM; San José, Costa Rica; gregory.guevara@netafim.com

2. Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica; Cartago, Costa Rica; darias@tec.ac.cr; jcvalverde@tec.ac.cr

3. Escuela de Ingeniería en Agronegocios, Tecnológico de Costa Rica; Cartago, Costa Rica; rocampos@tec.ac.cr

Recibido: 19/07/2017

Aceptado: 05/06/2018

Publicado: 19/09/2018

DOI: 10.18845/rfmk.v15i1.3710

Resumen

Pennisetum purpureum es una especie herbácea de rápido crecimiento con propiedades calorimétricas que la convierten en una especie con condiciones idóneas para ser implementada en proyectos biomásicos de generación eléctrica para Costa Rica. El presente estudio evaluó la factibilidad técnica y financiera de la especie dentro de condiciones de una plantación de alta densidad; para lo cual se estableció una plantación piloto de 12 hectáreas en Guanacaste, Costa Rica y se manejó con un ciclo productivo de 159 días y limitando su manejo a aplicaciones de tres dosis nutricionales de nitrógeno (85, 131 y 17 kg ha⁻¹); posterior de la cosecha se evaluó la biomasa acumulada, el poder calórico y su viabilidad financiera para ser implementada en una caldera de 2 MW de potencia. Los resultados mostraron una cosecha de: 85 a 110 ton ha⁻¹ de biomasa seca, encontrado los mayores valores en el tratamiento que usó mayor dosis de nitrógeno; también, se encontró que la biomasa seca de la especie es apenas del 24 % de la biomasa total, pero con un poder calórico superior a 3 800 cal g⁻¹, que incidió en que el potencial eléctrico real fuera de 1,33 MWh ton⁻¹ (considerando una caldera con una eficiencia del 30 %) suficiente para que una plantación de 200 ha con dos ciclos de cosecha al año y a una distancia inferior de 45 km de la planta pueda generar electricidad con una rentabilidad financieramente aceptable; el análisis financiero evidenció este tipo proyecto es viable siempre y cuando la producción de biomasa no sea menor a 120 ton ha⁻¹, el costo del kilowatt hora sea inferior 0,10 USD y la plantaciones no estén a más de 45 km de la planta.

Palabras clave: Especies herbáceas, bioenergía, análisis técnico, análisis financiero, plantaciones dendroenergéticas.

Introducción

En la última década se ha desarrollado una creciente demanda energética, que ha impactado el sector de la producción con el aumento del precio de venta de combustibles fósiles, gas natural, carbón mineral y la electricidad (Cardona et al., 2016); siendo necesario el desarrollo de paquetes tecnológicos que permitan la innovación de nuevas fuentes combustibles renovables que atiendan de manera sustentable la demanda del mercado, con un impacto al ambiente mínimo y un costo de producción más bajo (Cardona et al., 2012).

En el caso específico de Costa Rica desde el año 2000 se ha dado una tendencia anual en el aumento del costo de la tarifa eléctrica (del 2,2 % al 5 %) tanto para sector industrial como el residencial (MINAE, 2011); sin embargo, la generación de energía hidroeléctrica ha mostrado fluctuaciones por el fenómeno del niño y la

variabilidad climática, lo cual ha incidido en la utilización de energía térmica que utiliza combustibles fósiles, importados bajo los precios del mercado internacional, generando con ello un aumento del precio de la tarifa eléctrica en el país y un aumento de emisiones de gases de efecto invernadero (Herbert y Krishnan, 2016).

De manera tal, el desarrollo de energías alternativas sustentables se vuelve una creciente necesidad para Costa Rica, diversificando su matriz energética y asegurando la seguridad energética (MINAE, 2011). Costa Rica ha registrado avances importantes en el uso de energías alternativas como la geotérmica, eólica, solar y biomasa lignocelulósica (ICE, 2015), diversos estudios destacan la biomasa como un recurso abundante en el país, producto de la existencia un sector agrícola y forestal que implementan una gran variedad de cultivos (MAG, 2016). Sumado a esto hay una disponibilidad de aproximadamente del 15 % de la superficie del país, que en la actualidad se encuentra sin un uso de la tierra productivo o de conservación (MINAE, 2011). Por tanto, el desarrollo de cultivos con fines bioenergéticos combinado con un manejo integral de los residuos agrícolas y forestales, se vuelve una opción energética de valor agregado para el país (ICE, 2015).

Para el desarrollo de cultivos de producción de biomasa vegetal, independientemente a la utilización de especies de árboles, arbustos o hierbas se deben considerar los siguientes aspectos según Cone y Van Gelder (1999) y Gallego et al. (2015): (i) Rápido crecimiento: las especies a implementar deben ser de rápido desarrollo y acumulación de biomasa en el tiempo; (ii) Capacidad de rebrotar: deben presentar capacidad de recuperación del individuo post cosecha, mediante rebrotes, permitiendo desarrollo de ciclos continuos de obtención de biomasa; (iii) Mínimo manejo del cultivo: esto con el fin de disminuir los costos de producción y manejo de los cultivos que pueden afectar directamente el costo energético final y (iv) Sustentable para el sitio: con especies con características fisiológicas que le permitan adaptarse en el sitio y desarrollar el reciclaje suficiente de nutrientes que no degrade la calidad del suelo en el tiempo.

Entre las especies herbáceas con mayor potencial de desarrollo bioenergético se destaca el *Pennisetum purpureum* (King Grass) que es una herbácea originaria de África, se desarrolla entre los 0 y 1 500 msnm, con adaptabilidad a suelos con niveles de acidez altos (pH de 4 a 5) y baja disponibilidad nutricional (Gallego et al., 2015), también tolera periodos prolongados de sequía o regiones que presenten una precipitación anual mínima de 1 800 mm (Cardona et al., 2016), tiene capacidad de acumular de 26,3 a 37,7 ton ha⁻¹ de biomasa seca en 75 días (varía según los niveles nutricionales del suelo y disponibilidad de agua) debido a su alta capacidad

fotosintética y desarrollo de un sistema vascular complejo a nivel del tallo que optimiza el movimiento de nutrientes como el potasio y nitrógeno en la planta (Cardona et al., 2012; Cardona et al., 2016); también se reporta como una especie que comúnmente se ha empleado como bioremediador de suelos contaminados (Wang et al., 2012), fuente de alimento para especies ganaderas (Gallego et al., 2015) y recientemente como fuente de generación eléctrica, debido a que presenta valores calorimétricos de 4 000 a 4 200 kcal kg⁻¹, superiores a especies arbóreas como el *Eucalyptus deglupta* con 3 900 kcal kg⁻¹ y agronómicas como la *Saccharum officinarum* (Caña de azúcar) con 3 700 kcal kg⁻¹ (Suzuki et al., 2017).

A nivel mundial, el *Pennisetum purpureum* se ha empleado en sistemas de generación de bioenergía y biocombustibles en Asia y Sudamérica (Nolan, et al., 2017), obteniendo productividades anuales superiores a 50 ton ha⁻¹ de biomasa seca, con tres turnos de cosecha al año y con una viabilidad de 4 a 6 años de las cepas, con la ventaja que el manejo agronómico se limita a una fertilización anual y el desarrollo de sistemas de drenaje (Chen et al., 2009). En el caso de Costa Rica, se tiene experiencia con esta especie en la provincia de Guanacaste, específicamente con la empresa Pelón de la Bajura, que ha desarrollado ensayos piloto para el establecimiento, cosecha y manejo nutricional de la especie, además, del proceso de transformación que permita la generación eléctrica a través de tecnologías con el uso de calderas (Digman et al., 2010); sin embargo los estudios se han limitado a aspectos técnicos y no se han analizado aspectos como la viabilidad financiera y técnica de cultivo a largo plazo con fines de autogeneración eléctrica. El objetivo del estudio consistió en analizar la viabilidad técnica y financiera del cultivo de *Pennisetum purpureum* para la producción de biomasa con el fin de generación eléctrica.

Materiales y métodos

Sitio y especie de estudio

El estudio se llevó a cabo en una finca productiva de la empresa Pelón de la Bajura, dedicada al cultivo de Arroz (*Oryza sativa*); ubicada en Liberia, Guanacaste (10°29'09" N, 85°26'03" O), a una altitud de 14 m; con una temperatura media anual de 28 °C y una precipitación anual de 2 500 mm. El sitio se caracterizó por tener una topografía plana, con un suelo bien drenado y de textura franco arcillosa. A nivel químico el suelo presentó niveles aceptables de macro y micronutrientes, además de la presencia de un 3 % de materia orgánica en el primer horizonte.

Se sembraron 12 ha (en tres bloques de 4 ha cada uno) con la especie *Pennisetum purpureum*, procedente de una fuente semillera dedicada para alimentación animal y sembradas en cada bloque mediante siembra manual. El establecimiento se realizó en el mes de febrero del 2014 y se cultivó por un periodo de 159 días, se implementó un sistema de riego por goteo.

Análisis de la productividad y efectos de la fertilización

El ensayo se instaló bajo un diseño experimental de bloques completos al azar, con la implementación de tres dosis de fertilización (cuadro 1), replicándolos tres veces (cada tratamiento se aplicó en 1,3 ha de cada bloque). Se utilizaron tres dosis nutricionales de nitrógeno (manteniendo en cada dosis una aplicación constante de 20 kg ha⁻¹ de fósforo) según estudios previos para la especie que denotan el nitrógeno es un nutriente crítico para la producción de biomasa (Cardona et al., 2016), la aplicación nutricional se aplicó en el riego por goteo aplicado para cada bloque. La fertilización se aplicó entre el día 30 y 120 bajo dosificaciones diarias.

Posterior al día 159 se procedió a la cosecha y análisis biométrico de cada uno de los tratamientos, para el cual se tomó una muestra del 5 % de cada bloque y se evaluó la densidad de brotes por metro lineal (definido como cantidad de brotes en un metro lineal de distancia), altura total de la planta, altura total del tallo, peso verde del tallo y hojas.

Análisis de potencial energético de la especie

Cada planta cosechada se le sacó una muestra en condición verde de hojas y tallo que se pesaron y seguidamente se secaron a una temperatura de 105 °C por 48 horas (Block, 2006), posteriormente se pesaron en condición seca y con ambos valores se aplicó la ecuación 1 para el cálculo de porcentaje de materia.

$$PMS=(Ps/Pv)*100 \quad (1)$$

Donde: *PMS* es el porcentaje de materia seca; *Ps* es el peso seco de la muestra en gramos y *Pv* es el peso verde de la muestra en gramos.

Posterior al cálculo de *PMS* se determinó el potencial energético de la especie, el cual se estimó para muestras de tallo y hojas secas mediante una bomba calorimétrica de alta capacidad, implementada bajo la metodología de Block (2006) que permite calcular el potencial energético en términos de kcal kg⁻¹.

Con la determinación del potencial energético se estimó la energía total por tonelada de biomasa seca mediante la ecuación 2.

Cuadro 1. Tratamientos nutricionales aplicado a una plantación bioenergética de *P. purpureum* en Guanacaste, Costa Rica.

Table 1. Nutritional treatments applied to a bioenergetic plantation of *P. purpureum* in Guanacaste, Costa Rica.

Tratamiento	N (kg ha ⁻¹)	P (kg ha ⁻¹)
Dosis baja	85	20
Dosis elevada	171	20
Dosis media	131	20

$$ET = PE/1\ 000 * 4\ 186 \quad (2)$$

Donde: *ET* es energía en MJ ton⁻¹ biomasa seca y *PE* es el potencial energético en MWh ton⁻¹ de biomasa seca.

Una vez calculada la energía total por hectárea se aplicó una corrección para determinar el potencial eléctrico real que se estimó con la ecuación 3.

$$PET = ET / (3\ 600 * EC) \quad (3)$$

Donde: *PET* es el Potencial eléctrico teórico en MWh ton⁻¹ de biomasa seca; *ET* es la energía total y *EC* es la eficiencia de la tecnología de transformación eléctrica implementada.

Finalmente, con el conocimiento del porcentaje de materia seca, el potencial eléctrico real y el rendimiento productivo de la biomasa se calculó el potencial eléctrico real de un área de cultivo mediante la ecuación 4.

$$PoER = PET / (PBS * RDP) \quad (4)$$

Dónde: *PoER* es la potencia eléctrica real en MWh ha⁻¹; *PET* es el potencial eléctrico teórico en MWh ton⁻¹ de biomasa seca; *PBS* es el porcentaje de biomasa seca y *RDP* es el rendimiento productivo de la plantación en ton ha⁻¹.

Análisis de sensibilidad financiera

El análisis financiero se basó en los costos asociados (en dólares norteamericanos) en una plantación piloto que se presentan en el cuadro 2. Los siguientes supuestos productivos y financieros se plantearon para una vida útil del proyecto de 10 años:

1. Las labores de labranza implementadas fueron las mismas que aplican con el cultivo de la caña de azúcar.
2. La adquisición de una caldera con capacidad de generación eléctrica de 2 MW es de 2 000 000 USD.
3. Se estableció una plantación productiva de 200 ha con dos cosechas de biomasa al año.

4. Se considera un valor de rescate de la caldera en el año 10 de un 25 % del costo inicial.
5. Se asume un costo anual de mantenimiento de la caldera de 15 000 USD.
6. Por concepto de alquiler anual del terreno donde se establecería la plantación.
7. El riego se consideró como una única inversión que incluyó la compra de la tecnología, instalación y mantenimiento anual.
8. En la fertilización con nitrógeno y fósforo se consideraron los costos de aplicación de cloro en el sistema de riego como mantenimiento químico del sistema.
9. Los costos de siembra y semilla se consideraron en el establecimiento de la plantación.
10. La plantación se ubicará a menos de 10 km del campo a la planta de generación eléctrica.
11. Al sexto año hay una renovación del equipo de riego que tendría un costo de 800 USD ha⁻¹.
12. La tasa de interés anual nominal fue del 15 %.
13. Se asumió precio de venta de electricidad de 0,18 USD/kWh

El análisis de sensibilidad se basó en dos variables financieras: Valor anual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR). El VAN es la actualización de la diferencia de los cobros y pagos de un proyecto o inversión. Para ello se calcula todos los flujos de caja al momento presente descontándolos a un tipo de interés determinado (Kim y Park, 2016) tal como se presenta en la ecuación 5.

$$VAN = \sum_{i=1}^n \frac{V}{(1+k)^t} - I_0 \quad (5)$$

Donde: *VAN* es el valor actual neto; *V* son los valores netos de los flujos de caja; *I* es el valor de la inversión inicial y *k* es el tipo de interés.

En cuanto al TIR, se define como la media geométrica de los rendimientos futuros esperados de dicha inversión implica el supuesto de una oportunidad para reinvertir y se calcula con la ecuación 6.

$$TIR = \sum_{i=1}^n VPC_i \quad (6)$$

Cuadro 2. Costos asociados para el establecimiento y mantenimiento por hectárea de una plantación bioenergética de *P. purpureum* en Guanacaste, Costa Rica.

Table 2. Associated costs for the establishment and maintenance per hectare of a bioenergy plantation of *P. purpureum* in Guanacaste, Costa Rica.

Actividad	Cantidad	Costo/unitario (USD)	Costo total (USD)
Labranza			
Subsolado	1 pase/ha	200,00	200,00
Rastreo	2 pase/ha	150,00	300,00
Afinado	1 pase/ha	100,00	100,00
Surcado	1 pase/ha	100,00	100,00
Escarificado	2 pase/ha-año	100,00	200,00
Calderas y sitio			
Construcción Caldera	1 Glb/ha	-	10,000,00
Mantenimiento de Caldera	1 Glb/has-año	-	150,00
Tierra alquiler por año	1 Glb/has-año	400,00	400,00
Riego			
Llave en mano	1 Glb/ha	3,000,00	3,000,00
Diesel	3000 hr -año	0,11	330,00
Mano de obra en operación	160 días-ha -año	1,00	160,00
Fertilización y mantenimiento sistema			
Urea	14 Quintal/ha-año	28,00	392,00
Ácido Fosfórico	80 kg/ha-año	2,06	164,80
Cloro	120 l-año	0,46	55,20
Otras aplicaciones	1 Glb-año	100,00	100,00
Semilla y siembra			
Siembra	1 Glb/ha-año	40,00	40,00
Tapado	1 Glb/ha-año	100,00	100,00
Semilla	-	2000,00	500,00
Resiembras	1 Glb/ha-año	100,00	100,00
Cosecha			
Costos actividades de cosecha (CAT)	2 USD/ton	12,00	2400,00
Secado	2 Glb/ha-año	40,00	80,00

Donde: *TIR* es la tasa interna de retorno; *VPCi* es la sumatoria en valor presente del diferencial de los costos e ingresos e inversión del proyecto.

Análisis estadístico

La información se sistematizó y ordenó con la hoja de cálculo MS Excel versión 2013. Las variables bajo estudio se analizaron mediante análisis de varianza (ANDEVA), utilizando el paquete estadístico InfoStat versión 2011. Inicialmente, se realizó una verificación de la consistencia de los datos mediante un análisis gráfico tipo “Box-Plot” y seguidamente se generó un análisis de varianza (complementando con una prueba de Shapiro-Wilks de normalidad de los residuos y la prueba de Levene para la verificación de la homogeneidad de las varianzas); Las

diferencias entre tratamientos se verificaron mediante la prueba comparación múltiple de Tukey. Todos los análisis se desarrollaron con una significancia del 95 %.

En caso del análisis financiero, se desarrolló con las fórmulas financieras del programa MS Excel versión 2013.

Resultados

Impacto de la fertilización en la acumulación de biomasa

Los resultados de los tres tratamientos nutricionales no mostraron diferencias significativas para la variable

Cuadro 3. Valores de potencial eléctrico obtenidos para una plantación bioenergética de *P. purpureum* en Guanacaste, Costa Rica.

Table 3. Values of electric potential obtained for a bioenergy plantation of *P. purpureum* in Guanacaste, Costa Rica.

Parámetro	Valor obtenido
Potencial energético (MJ ton ⁻¹)	15,90
Potencial eléctrico teórico (MWh ton ⁻¹)	4,42
Potencial eléctrico real (MWh ton ⁻¹)	1,33

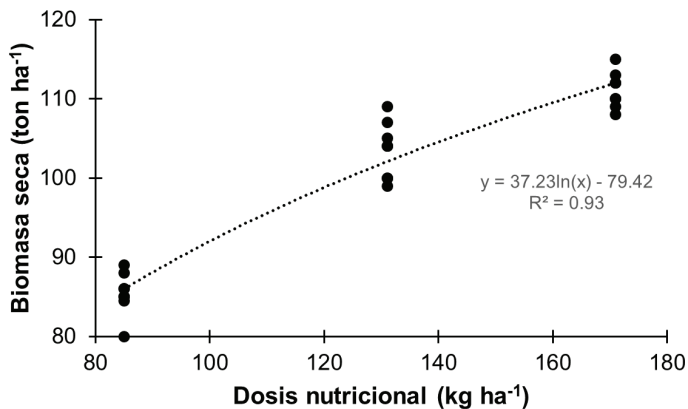


Figura 1. Relación de la acumulación de biomasa en función de la dosis de fertilización empleada para una plantación bioenergética de *P. purpureum* en Guanacaste, Costa Rica.

Figure 1. Relation of the accumulation of biomass in function of the fertilization dose used for a bioenergetic plantation of *P. purpureum* in Guanacaste, Costa Rica.

cantidad de plantas por unidad de distancia que en promedio fue de 32 plantas m⁻¹, ni para la variable altura total que en promedio fue de 3,7 m. Las diferencias estadísticas se encontraron en las variables de peso verde en la relación de biomasa tallo-hojas; encontrado que las plantas con dosis nutricional baja mostraron un peso promedio de 325 g distribuidos en 40 % en el sistema foliar y 60 % en el tallo; las plantas con la dosis nutricional media presentaron un peso promedio de 400 g distribuidos en 35 % sistema foliar y 60 % en el tallo; mientras la dosis elevada presentó el peso significativamente mayor de 435 g distribuidos en un 30 % sistema foliar y 70 % en el tallo. Es importante destacar que el contenido de humedad promedio de las pantas fue del 76 % y no mostró variación significativa entre tratamientos.

Las variaciones en peso verde y disposición de pesos dentro las plantas, impactó significativamente en los valores de biomasa seca obtenida en cada tratamiento, el tratamiento de dosis elevada presentaron los mayores valores de biomasa con (110,0 ± 5,5) ton ha⁻¹, seguida por la dosis media con (102,4 ± 4,9) ton ha⁻¹ y en el tratamiento de dosis baja con (85,0 ± 6,4) ton ha⁻¹.

Al analizar el comportamiento de la biomasa seca con respecto a la dosis nutricional (figura 1), se encontró una relación de tipo logarítmica, obteniendo una tendencia del aumento en la acumulación de biomasa conforme se aumentó la dosis nutricional (específicamente con el nitrógeno). Este comportamiento se sintetizó en la siguiente ecuación:

$$\text{Biomasa seca (ton ha}^{-1}\text{)} = 37,23 \cdot \ln(dn) + 79,42$$

Donde: *dn* es ka dosis nutricional (kg ha⁻¹)

El modelo que presentó un coeficiente de determinación de 0,93 y un error del 0,19.

Potencial energético del *P. purpureum*

El *P. purpureum* presentó un porcentaje promedio de materia seca del 24 % considerado como el porcentaje de biomasa real aprovechable; en el proceso de análisis de la potencialidad energética se encontró para el follaje una capacidad calorimétrica de 3 810 cal kg⁻¹ con una generación del 14,8 % de cenizas, con el tallo se determinó un potencial calorimétrico de 3 850 cal kg⁻¹ con un 6,2 % de cenizas. A partir de estos valores se estimaron los potenciales de generación que se presentan en el cuadro 3. El potencial energético de la plantación de *P. purpureum* fue de 15,90 MJ ton⁻¹, que incidieron que el potencial eléctrico teórico obtenido fuera de 4,42 MWh ton⁻¹, y que a partir de la utilización de un sistema de conversión eléctrica con una eficiencia del 30 % (asumiendo que no toda la biomasa presentaría un contenido de humedad del 30 % para la combustión y que en el proceso de transporte se daría una pérdida del 10 % de biomasa), el potencial eléctrico real fue de 1,33 MWh ton⁻¹.

Al relacionar el potencial eléctrico real con la productividad promedio obtenida de 100 ton ha⁻¹ de biomasa seca que se cosecharía dos veces al año, se obtuvo un potencial real por hectárea de 266 MWh.

Análisis de sensibilidad financiera

A partir de los supuestos financieros planteados en conjunto con la productividad obtenida y el potencial eléctrico real, se determinó que la plantación dendroenergética podría generar un valor productivo eléctrico de 11 272 USD ha⁻¹ al año, siendo rentable hasta el tercer año de operación del proyecto (debido a que en los primeros dos años parte de la ganancia generada debe cubrir los costos de desarrollo, las operaciones y una parte de la inversión inicial), con un VAN de 17 700 USD ha⁻¹ y TIR del 39 %, haciendo que el proyecto sea rentable bajo un costo de venta de electricidad en el mercado eléctrico de 0,18 USD/kWh; es importante destacar que bajo este escenario, el costo de operación representó el 40 % de los costos totales, en cambio la

Cuadro 4. Análisis financiero de dos escenarios de utilización de los 2 MW de electricidad generada a partir de biomasa vegetal con cambios en los escenarios del mercado.

Table 4. Financial analysis of two scenarios of utilization of the 2 MW of electricity generated from plant biomass with changes in market scenarios.

Escenario	TIR (%)	VAN (USD/ha)	Comentarios
Aumento anual del 5 % del precio de la electricidad.	47,1	28,5	Se considera un escenario con altas posibilidades de desarrollo, en el que proyecto es viable.
Disminución de productividad de campo a 120 ton/ha-año de biomasa seca.	16,0	22,2	Aun con disminuciones del 40 % productividad de biomasa el proyecto es viable.
CAT aumenta 26 USD/ton.	16,2	883,1	El proyecto es viable siempre y cuando la distancia de la biomasa a la planta sea inferior a 45 km.
El precio de la electricidad baja a 0,125 USD/KWh (producción biomasa en campo se mantiene).	15,0	173,0	El proyecto es viable con precios eléctricos en el mercado superiores a 0,10 USD/KWh.
El precio de la electricidad baja a 0,15 USD/kWh y la producción biomasa baja a 150 ton/ha-año.	5,4	-207,0	el proyecto no es viable bajo estas condiciones, siendo necesario en este caso aumentar la disponibilidad anual de biomasa o esperar un aumento del precio eléctrico del mercado.
CAT aumenta 12,5 USD/Ton y la producción biomasa baja a 150 ton/ha-año.	15,2	-880,0	En este tipo de escenario el proyecto es viable si la distancia de la biomasa a la planta sea inferior a 20 km.

inversión representaría el 35 %, y costos fijos y otros alcanzaría el 25 % del costo total.

Al analizar el proyecto bajo distintos escenarios (cuadro 4) se encontraron los siguientes resultados: (i) Aumentos en el precio del mercado de venta del kWh benefician la rentabilidad del proyecto, el cual tiene una tolerancia mínima de precio venta de 0,10 USD/KWh, valores inferiores hacen que el proyecto no sea viable; (ii) El proyecto tolera una disminución de la productividad anual de la plantación hasta 120 ton ha⁻¹, siempre y cuando el precio de mercado de venta sea mayor a 0,12 USD/kWh; con valores menores se hace necesaria la adquisición de biomasa a una distancia menor de 15 km alrededor de la planta; (iii) El proyecto tolera transporte de biomasa hasta 45 km a la redonda de la planta, siempre y cuando el costo aprovechamiento (CAT) no supere el 25 % del costo de producción del kWh y su precio de venta en mercado no sea menor a 0,12 USD/KWh; (iv) Si el costo de venta del kWh es inferior a 0,12 USD en conjunto una disminución del 35 % de la productividad de la plantación, esto haría inviable el proyecto y (v) La variable de mayor peso en la viabilidad del proyecto, es el precio de venta de electricidad el cual solo puede ser subsanado con disminuciones en los costos de producción y un aumento en la eficiencia de la caldera.

Discusión

Potencial productivo del *P. purpureum*

Los resultados obtenidos de producción de biomasa de 85 a 110 ton ha⁻¹ en 159 días son similares a los

presentados por Wang et al. (2012) en la región este de China que presentaron en 180 días valores de 90 a 125 ton ha⁻¹ de biomasa seca y reportando que los valores máximos posibles para esta especie se alcanzan a los 210 días de cultivo con valores máximos de 155 ton ha⁻¹, siendo necesario para alcanzar dichos niveles, la aplicación de fertilizantes con dosis mínimas de 200 kg ha⁻¹ de nitrógeno, 30 kg ha⁻¹ de potasio y 20 kg ha⁻¹ de fósforo; nutrientes que son de alta demanda por *P. purpureum* y que en un proceso de cultivo intensivo se pueden extraer del sistema entre un 20 y 35 % en seis ciclos de cosecha realizados cada 4 meses (Wang et al., 2012).

Por su parte, los estudios desarrollados por Cardona et al. (2012) resaltan que el nutriente nitrógeno es el de mayor importancia para la promoción de crecimiento y fijación de biomasa para la especie, esto debido a que es un elemento móvil dentro de la planta que se usa para la construcción de las paredes celulares y crecimiento del meristemo apical, encontrando que dosis superiores a 15 kg ha⁻¹ generan aumentos en la producción de biomasa en un 10 % en un mes para la especie con una densidad de siembra de 40 plantas por metro lineal. Por su parte Gallego et al. (2015) reportó que la implementación de programas continuos de fertilización en plantaciones intensivas de *P. purpureum*, incrementan de dos a tres ciclos (de 6 meses cada uno) el tiempo de vida de las cepas establecidas en suelos ácidos (con un pH de 5,3 a 6,5) y con un sistema de drenaje regular, esto debido a que se evita la degradación nutricional del suelo y le permite a la planta un ciclaje nutricional de forma más eficiente.

La eficacia de crecimiento y fijación de carbono por parte de *P. purpureum* se debe a la alta eficiencia fotosintética (es una planta con fotosíntesis C4) y a un consumo moderado en agua, que permite que requiera un desarrollo corto del follaje (que tiende ser del 20 a 40 % del peso total de la planta) y que en conjunto con un sistema vascular muy eficiente permite hacer movimientos de nutrientes, glucosa y agua al sistema apical, permitiendo con ello tasas de crecimiento mensuales de 20 a 40 ton ha⁻¹ (Cardona et al., 2016) y generando con ello que la planta presente una composición del 30 al 40 % de celulosa y del 25 a 40 % de lignina, constituyentes que influyen directamente en el poder calórico (Herbert y Krishnan, 2016), además que con un sistema vascular altamente desarrollarlo con diámetros de vasos de 10 a 35 μm y a densidades de 12,3 a 18,9 vasos μm⁻², inciden que la especie acumule de 50 a 80 % de su peso en agua, generando que en periodos de 24 a 72 horas post cosecha, su peso y volumen disminuyan significativamente (Cardona et al. 2016).

Ante la composición química alta en celulosa y lignina en conjunto con la facilidad de pérdida de humedad, inciden que el potencial eléctrico real de la especie varíe de 0,95 a 1,95 MWh ton⁻¹ según menciona Nolan et al. (2017), siendo un valor óptimo para cultivos de ciclo de corta inferiores a 6 meses, el rango de 1,0 a 2,1 MWh ton⁻¹, lo cual permite desarrollar programas de plantación energética con magnitud moderada (de 50 a 500 ha) y que implementen tecnologías de transformación con eficiencia baja (de 20 a 40 %). Gallego et al. (2015), menciona para esta especie que el desarrollo de programas nutricionales en conjunto con la renovación cíclica de las cepas, es fundamental para la viabilidad técnica del cultivo, ya que su omisión en el mediano plazo (de tres a cuatro ciclos) puede incidir en la pérdida productiva del cultivo a razón de 30 a 40 ton ha⁻¹ por ciclo de cosecha.

Consideraciones financieras en la generación eléctrica a partir de biomasa

La potencialidad financiera de generación de energía a partir de la biomasa de *P. purpureum* se debe a la alta capacidad de acumulación de biomasa, a sus requerimientos mínimos de manejo agronómico y a la facilidad de cosecha de la especie; elementos que Bilgili et al. (2017), menciona inciden en la disminución de los costos operativos en conjunto con el aumento de la productividad de la materia prima con un alto valor calórico, aumentando la potencialidad financiera de un proyecto energético; Kim y Park (2016) mencionan la posibilidad de disponer de un margen de contracción eléctrica del precio de venta del kWh del 20 %, aumentando la rentabilidad del proyecto en un 45 %.

Entre los elementos limitantes en la viabilidad financiera de los proyectos energéticos, están los costos de

producción y la eficiencia del sistema de transformación energética de la biomasa, en este caso la implementación de calderas con eficiencias del 30 al 50 %, limitan la rentabilidad de los proyectos. Por ello se considera que reducciones superiores del 40 % en la productividad de la plantación, hace inviable un proyecto, situación que Gonzalez-Salazar et al. (2016) menciona es un valor razonable para cultivos con especies herbáceas. Además, Kim y Park (2016) destacan que este tipo de proyectos se deben establecer en distancias no mayores a 40 km de la plantación a la planta de transformación.

Finalmente, se debe considerar que este tipo proyectos permiten acceder a nuevos paquetes de apoyo financiero como son los mercados limpios para los productos que se desarrollan con tecnología limpias, contribuyendo al autoabastecimiento energético a nivel regional (Biddinika et al., 2017).

Conclusiones

Es viable el desarrollo de proyectos de generación de energía eléctrica a partir de la biomasa de *P. purpureum*, al ser una especie que puede generar dos cosechas de biomasa al año con una productividad superior a las 100 ton ha⁻¹, con un mantenimiento mínimo y enfatizado a la aplicación de paquetes nutricionales con dosificaciones no menores de 150 kg ha⁻¹ de nitrógeno, elemento fundamental para crecimiento de la especie; que presentó un potencial calórico superior a 3 800 cal kg⁻¹ y un potencial eléctrico real de 1,33 MWh/ton de biomasa seca, capaz de abastecer una planta de producción eléctrica de 2 MW.

La viabilidad financiera de una planta de 2 MW a partir esta especie es alta y se dependería de variables como el precio de venta de electricidad siempre y cuando no sea inferior a 0,10 USD kWh, no sé de un aumento CAT y la biomasa se encuentre a menos de 45 km a la redonda de la planta generadora y que la productividad de la plantación sea menor de 120 ton ha⁻¹ al año.

Agradecimientos

Agradecemos a la Maestría de Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de la Producción, a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Tecnológico de Costa Rica, al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT) por todo el apoyo logístico, técnico y financiero brindado durante la ejecución del presente estudio que formó parte del proyecto "Impulso tecnológico para

Referencias

- Bilgili, M., Koçak, E., Bulut, U., Kurkaya, S. (2017). Can biomass energy be an efficient policy tool for sustainable development?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 2017: 830-845.
- Block, E. (2006). *Measure dry matter for a consistent ration*. Nueva York, Estados Unidos: El Lechero.
- Biddinika, M., Ali, R., Rosyadi, R., Diponegoro, A., Tokimatsu, K., Takahashi, F (2017). Challenges on the Adoption of Rapid Appraisal Method for Assessment of Online Information on Biomass Energy, *Energy Procedia*, 105: 3207-3212.
- Cardona, E.M., Rios, L.A., Peña, J.D. (2012). Disponibilidad de variedades de pastos y forrajes como potenciales materiales lignocelulósica para la producción de bioetanol en Colombia, *Inf. Technol.* 23: 87-96.
- Cardona, E., Rios, L., Peña, J., Peñuela, M., Rios, L. (2016). King Grass: A very promising material for the production of second generation ethanol in tropical countries. *Biomass and Bioenergy*, 95: 206-213
- Chen, M., Zhao., Xia, I. (2009). Comparison of four different chemical pretreatments of corn stover for enhancing enzymatic digestibility, *Biomass Bioenergy* 33: 1381-1385.
- Cone, J.W., Van Gelder, A.H. (1999). Influence of protein fermentation on gas production profiles. *Animal Feed Science and Technology*. 76, 251-264.
- Digman, M., Shinnors, K., Casler, M., Dien, B., Hatfield, R., Jung, H.(2010). Optimizing on-farm pretreatment of perennial grasses for fuel ethanol production. *Bioresour. Technol*, 101: 5305-5314.
- Gallego, L., Escobar, A., Peñela., Peña, J., Rios, L. (2015). King Grass: a promising material for the production of second-generation butanol, *Fuel* 143: 399-403.
- Gonzalez-Salazar, M., Venturini, M., Poganietz, W., Finkenrath, M., Ruggero, P. (2016). Methodology for improving the reliability of biomass energy potential estimation, *Biomass and Bioenergy*, 88: 43-58.
- Herbert, G., Krishnan, A. (2016). Quantifying environmental performance of biomass energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59: 292-308.
- ICE. (2015). *Potencialidad nuevas energías de producción eléctrica*. San José, Costa Rica: ICE.
- Kim, K., Park, K. (2016). Financial development and deployment of renewable energy technologies, *Energy Economics*, 59: 238-250
- MAG. (2016). *Usos y tendencias de la tierra en Costa Rica*. San José, Costa Rica: MAG.
- MINAE. (2011). *Perspectiva nacional hacia la Carbono Neutralidad 2012 y sus respectivos restos*. San José, Costa Rica: MINAE.
- Nolan, P., Doyleb, M., Grantc, J., O’Kiely, P. (2017). Upgrading grass biomass during ensiling with contrasting fibrolytic enzyme additives for enhanced methane production. *Renewable Energy*, 5:456-466
- Suzuki, K., Tsuji, N., Shirai, Y., Hassan, M., Osaki, M. (2017). Evaluation of biomass energy potential towards achieving sustainability in biomass energy utilization in Sabah, Malaysia. *Biomass and Bioenergy*, 97: 149-154.
- Wang, Z., Li, R., Xu, J., Marita, J., Hatfield, R., Qu, R. (2012). Sodium hydroxide pretreatment of genetically modified switchgrass for improved enzymatic release of sugars. *Bioresour. Technol.* 56:1-7.

Este artículo debe citarse como:

Guevara, G; Arias, D; Valvede, JC; Campos, R. (2018). Factibilidad técnica y financiera del cultivo de *Pennisetum purpureum* (Schumach) para la producción de biomasa con el fin de generación eléctrica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15 (suppl. 01), 07-15. doi. 10.18845/rfmk.v15i1.3710