

APÉNDICE: Cartilla
Energía a partir de plantas vivas

ENERGÍA A PARTIR DE PLANTAS VIVAS

Inventario de plantas usadas en Celdas de Combustible Microbianas

Sallyslain Solognier



Presentación

En este documento se presenta un inventario de las plantas usadas en las celdas de combustible microbianas. Es el resultado del estudio investigativo respecto a la producción de energía lumínica a partir de plantas vivas. Esta recopilación tiene como finalidad presentar información indispensable sobre el comportamiento de la planta dentro de una celda de combustible microbiana, por esta razón cabe resaltar que, aunque una planta no muestre resultados significativos, no se puede concluir que no es adecuada para la biotecnología, se requiere profundizar en investigaciones al respecto.

Diseño e investigación

Sallyslain Solognier

Docente

Angélica Candela

Institución

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia.

2020

ÍNDICE DE ESPECIES

pág.	
ENERGÍA A PARTIR DE PLANTAS VIVAS	2
ESPECIES DE PLANTAS Y GENERACIÓN DE POTENCIAL	6
Acorus tatarinowii	9
Agapanthus africanus L. Hoffman	12
Arundinella anomala Steudel var. ciliata	14
Arundo donax Linneaus	17
Brassica juncea Linneaus	20
Canna lily ‘stuttgart’	23
Canna indica Linnaeus	25
Chasmanthe floribunda	28
Chlorophytum comosum Thunberg	30
Cyperus involucratus Rottboll	33
Dracaena braunii Engl.	36
Eichhornia crassipes Mart.	38
Epipremnum aureum Lind. & Andre	41
Glyceria máxima (Hartman) Holmberg	43
Lolium perenne Linnaeus	45
Oryza sativa Linnaeus	47
Puccinellia distans (Jacquin)	49
Especies Sedum	52
Spartina anglica C.E.Hubbard, Bot.	57
Sporobolus arabicus Boiss.	61
Trigonella foenum-graecum Linnaeus	63

Vetiveria zizanioides Nash	64
Cyperus papyrus Linnaeus	66
Ipomoea aquatica Forsskal	68
Phragmites australis	70
Referencias	72
Bibliografía	74

ESPECIES DE PLANTAS Y GENERACIÓN DE POTENCIAL

Tabla 1. Resumen de datos registrados por especie de planta.

<i>Especie</i>	Familia	Vía fotosintética	Valores registrados	Unidades registradas	Referencia
<i>Acorus tatarinowii</i>	Acoraceae		21	mW/m ²	(Liu, Ji, & Zhai, 2018)
<i>Agapanthus africanus</i>	Amaryllidaceae		15,5	mW/cm ²	(Gómora-Hernández, Serment-Guerrero, Carreño-De-león, & Flores-Alamo, 2020)
<i>Arundinella anomala</i>	Poaceae	C4	22	mW/m ²	(M. Helder et al., 2010)
<i>Arundo donax</i>	Poaceae	C3	-	Fallo del sistema	M. Helder et al., 2010)
<i>Brassica juncea</i>	Brassicaceae		69,32	mW/m ²	(Sophia & Sreeja, 2017)
<i>Canna 'stuttgart' lily</i>	Cannaceae	C4	222,54	mW/m ²	(Sophia & Sreeja, 2017)
<i>Canna indica</i>	Cannaceae	C4	15,73	mW/m ²	(Kabutey et al., 2019)
			18	mW/m ²	(Lu, Xing, & Ren, 2015)
			320,8	mW/m ³	(Kabutey et al., 2019)
			5,11	mW/m ³	(Kabutey et al., 2019)
<i>Ceratophyllum demersum</i>	Ceratophyllaceae		9	mW/m ³	(Kothapalli, 2013)
<i>Chasmanthe floribunda</i>	Iridaceae	C3	0,21	mW/m ²	(Azri et al., 2018)
<i>Chlorophytum comosum</i>	Agavaceae	C3	18	mW/m ²	(Azri et al., 2018)
<i>Cyperus involucratos R.</i>	Cyperaceae	C3	5,99	mW/m ²	(Klaisongkram & Holasut, 2015)
<i>Cyperus papyrus</i>	Cyperaceae	C4	1,083	mW/m ²	(Azri et al., 2018)
			510 ± 92	mW/m ³	(Gulamhussein & Randall, 2020)
<i>Dracaena braunii</i>	Asparagaceae		12,78	mW/m ²	(Sarma & Mohanty, 2018)
<i>Eichhornia crassipes</i>	Pontederiaceae	C3	224,93	mA/m ²	(Venkata Mohan, Mohanakrishna, & Chiranjeevi, 2011)
			100,2	mW/m ²	(Widharyanti, Hendrawan, & Christwardana, 2020)
<i>Elodea nuttallii</i>	Hydrocharitaceae		184,8	mW/m ³	(Kabutey et al., 2019)
<i>Epipremnum aureum</i>	Araceae	C3	15,38	mW/m ²	(Sarma & Mohanty, 2018)

<i>Especie</i>	Familia	Vía fotosintética	Valores registrados	Unidades registradas	Referencia
<i>Glyceria maxima</i>	Poaceae	C3	67	mW/m ²	(Strik et al., 2008)
			80	mW/m ²	(Ruud A. Timmers et al., 2012)
			60	mW/m ²	(Ruud A. Timmers et al., 2013)
<i>Ipomoea aquatica</i>	Convolvulaceae	C3	0,149	mW/m ³	(Kabutey et al., 2019)
			12,42	mW/m ²	
			30,2	mW/m ²	
			55,05	mW/m ²	
			0,852	mW/m ³	
			6,35	mW/m ²	(Pamintuan, Clomera, Garcia, Ravara, & Salamat, 2018)
<i>Lolium perenne</i>	Poaceae	C3	55	mA/m ²	(Kabutey et al., 2019)
<i>Oryza sativa</i>	Poaceae	C3	153,66	mW/m ²	(Kabutey et al., 2019)
			14	mW/m ²	
			15	mA/m ²	
			14	mW/m ²	
			6	mW/m ²	
			140	mW/m ²	
			61,72	mW/m ²	
<i>Phragmites australis</i>	Poaceae		9,35	mW/m ²	(Kabutey et al., 2019)
			43	mW/m ²	
			0,001	mW/m ³	
			0,268	mW/m ³	
			0,15	mW/m ³	
			22	mW/m ²	(K. Wetser et al., 2017)
			1,3	mW/m ²	(K. Wetser et al., 2015)
			520	mV	(Moqsud et al., 2017)
<i>Puccinellia distans</i>	Poaceae		83,7	mW/m ²	(Tou et al., 2019)
<i>Sedum album</i>	Crassulaceae	CAM	0,0024	μW/m ²	(Tapia et al., 2017)
<i>Sedum hybridum</i>			0,092	μW/m ²	
<i>Sedum kamshaticum</i>			0,001	μW/m ²	
<i>Sedum reflexum</i>			0,001	μW/m ²	
<i>Sedum rupestre</i>			0,0155	μW/m ²	

<i>Especie</i>	Familia	Vía fotosintética	Valores registrados	Unidades registradas	Referencia
<i>Sedum sexangulare</i>			0,0084	$\mu\text{W}/\text{m}^2$	
<i>Sedum spurium</i>			0,001	$\mu\text{W}/\text{m}^2$	
			79	mW/m^2	(Ruud A. Timmers et al., 2010)
			222	mW/m^2	(M. Helder et al., 2010)
<i>Spartina anglica</i>	Poaceae	C4	469	mA/m^2	(M. Helder et al., 2012)
			679	mW/m^2	(Koen Wetser et al., 2015)
			82	mW/m^2	(K. Wetser et al., 2017)
<i>Sporobolus arabicus</i>	Poaceae	C4	120	mW/m^2	(Gilani et al., 2016)
<i>Trigonella foenumgraecum</i>	Fabaceae		80,26	mW/m^2	(Sophia & Sreeja, 2017)
			6,12	mW/m^2	(Kabutey et al., 2019)
<i>Typha latifolia</i>	Typhaceae	C3	93	mW/m^3	(Kabutey et al., 2019)
<i>Vetiveria zizaniodes Nash</i>	Poaceae		242	mA/m^2	(Regmi et al., 2018)

Acorus tatarinowii

Acorus gramineus Solander ex Aiton, Hortus Kew.



Figura 1. *Acorus gramineus* Soland.

Familia

Acoraceae

Nombre común

Shi Chang Pu (China)

Descripción

Es una planta que es capaz de crecer en zonas semi-acuáticas tiene un rizoma muy

ramificado, delgado y aromático; posee hojas largas con un ápice acuminado y están dispuestas en fascículos de unos 30 a 50 cm de longitud y 2 a 4 cm de ancho; poseen una nervadura mediana muy marcada; la inflorescencia forma un espádice con tallo cilíndrico de más o menos 5 a 10 cm de longitud. Sus flores son pequeñas de color amarillo-verdoso y son hermafroditas. El fruto es una baya alargada de color rojo brillante. Es una especie que se extiende agresivamente por su rizoma, lo que crear las condiciones favorables para su reproducción en bordes de estanques, jardines de agua o sumergidos en acuarios de agua dulce (eFloras, s.f.) .

Origen

Camboya, India, Japón, Corea, Laos, Myanmar, Filipinas, Rusia (Siberia), Tailandia y Vietnam

Comentarios de autores

En el estudio llevado a cabo por Liu et al., investigó la actividad microbiana en el ánodo, la generación de energía y los perfiles de oxígeno en el sedimento, todo esto acompañado de los efectos que tiene las raíces de la planta *A. tatarinowii*. Esto se evaluó ubicando el ánodo en diversos puntos de la celda. Concluyendo que la relativa ubicación del electrodo, respecto a las raíces, puede ser un factor clave que influencia la materia orgánica y la pérdida de oxígeno derivada de la raíz en un sistema de celdas de combustible microbiana. De esta forma, disponiendo las raíces en la superficie del ánodo, demostró que la configuración no fue óptima puesto que aquí se presentaba una alta pérdida de oxígeno derivada de la raíz lo que incrementaba un problema de coexistencia entre las bacterias aeróbicas y las bacterias electroquímicas activas (Liu, 2018).



Figura 2. 1-4. *Acorus calamus* Linnaeus var. *Chinensis* (Linnaeus). - 1. Habitad. - 2. Flor. - 3. Sección longitudinal del ovario. - 4. Ovulo. 5,6. *A. gramineus* Solander ex Aiton [*A. tatarinowii* Schott]. - 5. Parte superior de la planta con inflorescencia. - 6. Porción axial de la superficie de la hoja. 7-14. *Anadendrum* sp. [*A. monranum* Schott]. - 7. Rama floreciendo. - 8. Porción axial de la superficie de la hoja. - 9. Espádice. - 10. Flor. - 11, 12. Vistas axial y abacial del estambre. - 13. Ovario. - 14. Sección longitudinal del ovario mostrando los óvulos. Fuente: (Rong, 1979)

Por esa razón la investigación concluyó y recomienda que el ánodo debe ser colocado a una distancia apropiada de la raíz para así evitar la presencia de oxígeno (Liu, 2018) y a su vez un fallo en el sistema, puesto que este compartimiento anódico, en estudios anteriores, ha demostrado una mayor eficiencia bajo condiciones anaeróbicas.

Agapanthus africanus L. Hoffman

Familia

Amaryllidaceae

Nombre común

Lirio africano

Descripción

El lirio africano es una planta herbácea rizomatosa, la cual posee un tallo corto el cual posee varias hojas alargadas, arciformes como de 10 a 35 cm de longitud y de 1 a 2 de ancho además posee una estirpe floral de 25 a 60 cm de longitud que se va coronando por lo menos de 20 a 30 flores de color violeta brillante o blanco; cada flor resulta ser hermafrodita y actinomorfa (Bailey, 2005).

Origen

Sudáfrica

Comentarios de autores

La especie *agapanthus africanus* tiene como característica la abundancia de su biomasa, la alta adaptabilidad al clima regional, y su capacidad de crecimiento durante el



Figura 3. *Agapanthus africanus* L. Hoffman

año, así como la versatilidad que posee gracias a la gran cantidad de rizomas que es capaz de producir (Gómora-Hernández et al., 2020).

Frente al uso en celdas de combustible microbianas, no hay datos previos reportados. Sin embargo, Gómora-Hernández et al., planteó en su investigación que la presencia de fibra de carbón y la generación de voltaje desde las raíces de las plantas no afectan el crecimiento de la planta. Es decir, no afecta la vitalidad de la planta. Lo que ofrece la producción de energía verde y el cultivo de plantas ornamentales (Gómora-Hernández et al., 2020).

Arundinella anomala Steudel var. *ciliata*

Arundinella hirta (Thunb.)

Familia

Poaceae

Nombre común

Usgetoda Shiba (ウスゲトダシバ)

Descripción

El ancho de la hoja es de 0,5 a 1,5 cm y se envuelve ligeramente hacia adentro. Las hojas tienen pelo suave, pero existen diferencias individuales en la cantidad de pelo. También existe la teoría de que los que tienen mucho pelo se clasifican como variación *hirta*, mientras que los que tienen menos pelo se clasifican como variación *ciliata* (*Arundinella anomala*). Sin embargo, incluyéndolos a ambos en general, se les conoce como todashiba. El rizoma se arrastra hacia los lados, el tallo está erguido y hay pelos cortos en los nudos. La lengua de la hoja es corta y tiene Muchas espigas están unidas a la inflorescencia cónica. Existen muchas variaciones en la longitud y densidad de las ramas de la inflorescencia. Las mazorcas miden entre 3,5 y 4 mm de largo,



Figura 4. *Arundinella anomala* Steudel

Fuente: (Katou, 2009) .

están teñidas de verde a púrpura, con llamativas franjas verdes y dos floretes. Cuando las espigas se tiñen de púrpura, toda la inflorescencia aparece teñida de púrpura. La primera espada mide 3,5-4 mm de largo y está unida para sostener la base de la segunda espada. El primer florete es masculino. El segundo florete es bisexual y da frutos, y el guardián y las conchas internas son delgadas y tienen el pelo blanco en la base del guardián. Las anteras que sobresalen de las orejas y el estigma en forma de pincel son de color marrón púrpura. Los frutos son de 1,8 a 2 mm de largo y de color gris oscuro a marrón oscuro (Katou, 2009)

Origen

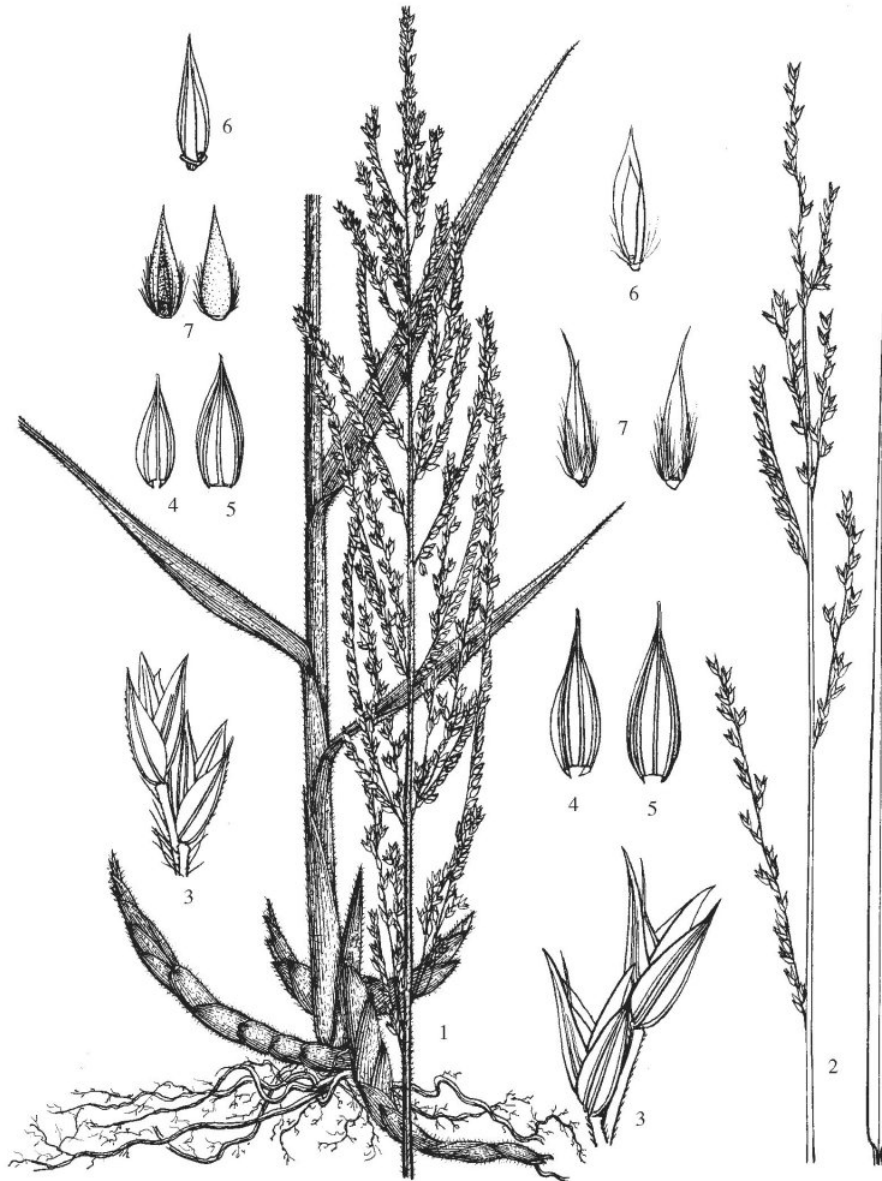
Hokkaido, Honshu, Shikoku, Kyushu, Corea, China, Taiwán, Rusia (Katou, 2009).

Comentarios autores

Arundinella hirta (Thunb.) Tanaka es el sinónimo de *Arundinella anomala* Steud pertenecientes a la familia Poaceae (WFO, 2020); esta especie tiene la capacidad de sobrevivir bajo condiciones de anegación, sin embargo, crece en marismas frescos de agua dulce, es decir, no tiene la ventaja de la baja resistencia interna que se le atribuye a la alta fuerza iónica de las soluciones; Además, en su proceso fotosintético tiene la característica de usar la vía fotosintética C4, que en general, es más eficiente que la vía C3 (M. Helder et al., 2010)..

Por otro lado, teniendo presente los resultados de producción de electricidad entre *A. anomala* y *spartina anglica*, Helder et al. concluyó que las dos celdas produjeron aproximadamente la misma cantidad de energía eléctrica. Sin embargo, la máxima

producción de poder fue distinta; mientras para *S. anglica* fue de 222 mW/m², para *a. anomala* fue de 22 mW/m².



Cabe destacar que *spartina anglica* es un halófito, es decir es una planta adaptada a crecer en condiciones salinas, a comparación de *a. hirta* que es una especie de agua dulce. Las condiciones saladas proveen iones de forma abundante a las celdas, lo que facilita el transporte a través de la membrana (M. Helder et al., 2010).

Figura 5. 1-7. *Arundinella hirta* (Thunberg) Tanaka, (*A. anomala* Steudel). -1. Planta peluda. -2. Lámina de hoja y panícula de la planta glabra. -3. Par de espiguillas. -4. Gluma inferior. -5. Gluma superior. -6. Florete inferior. -7. Vistas abaxial y adaxial del florete superior. Fuente: (eFlorae, 1990)

Arundo donax Linneaus

Familia

Poaceae

Nombre común

Caña común

Descripción

Esta es una especie semejante al bambú, pero se diferencia porque de cada nudo sale una única hoja que envaina el tallo. Es una especie que alcanza los 3 a 6 metros de altura, tiene un tallo grueso y hueco; las hojas son lanceoladas, largas de 5 a 7 cm que envuelven el tallo en forma de láminas verdes; las flores están en una gran panícula de tonalidades violáceas o amarillas de 3 a 6 diámetros de longitud; cada espiguilla tiene de 1 o 2 flores.

Tienen capacidad para vivir en humedales

de aguas permanentes o estacionales, éstas extienden por sus rizomas subterráneos los cual es forman largas colonias de varios a lo largo de los cursos del agua (eFloras, s.f.).

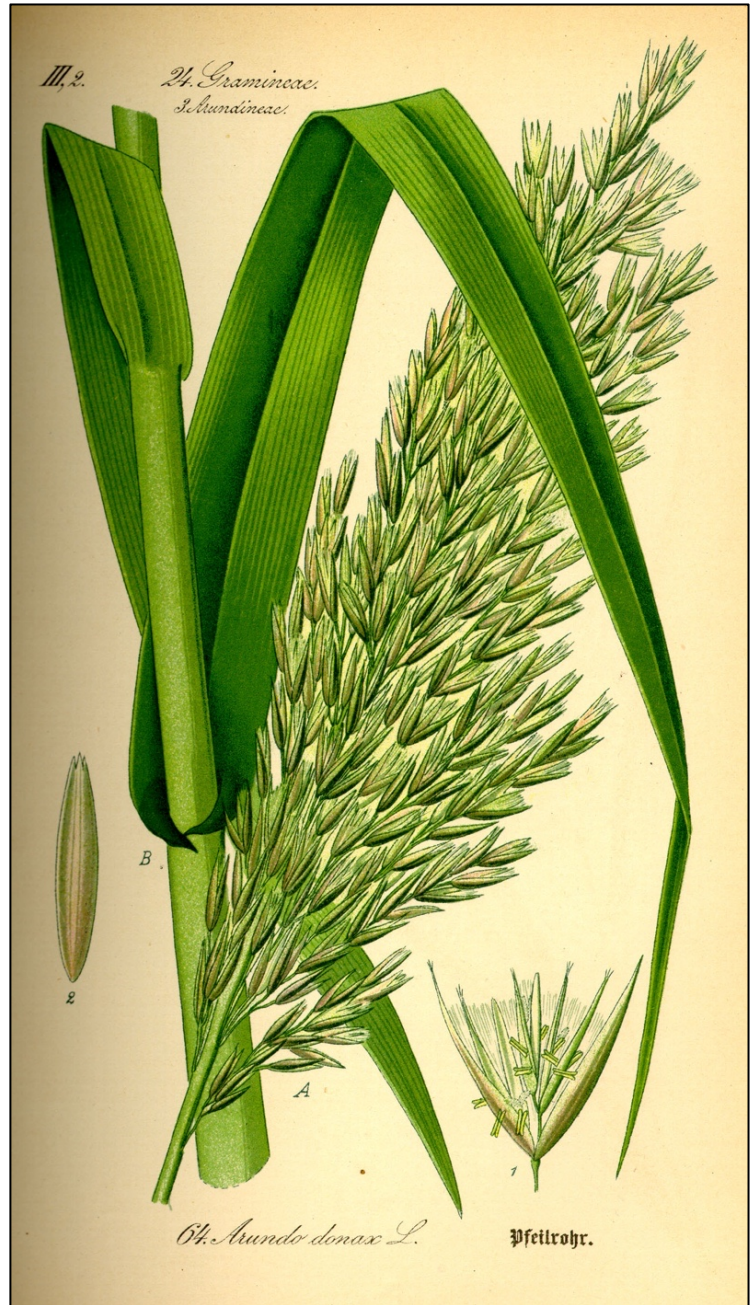


Figura 6. Arundo donax

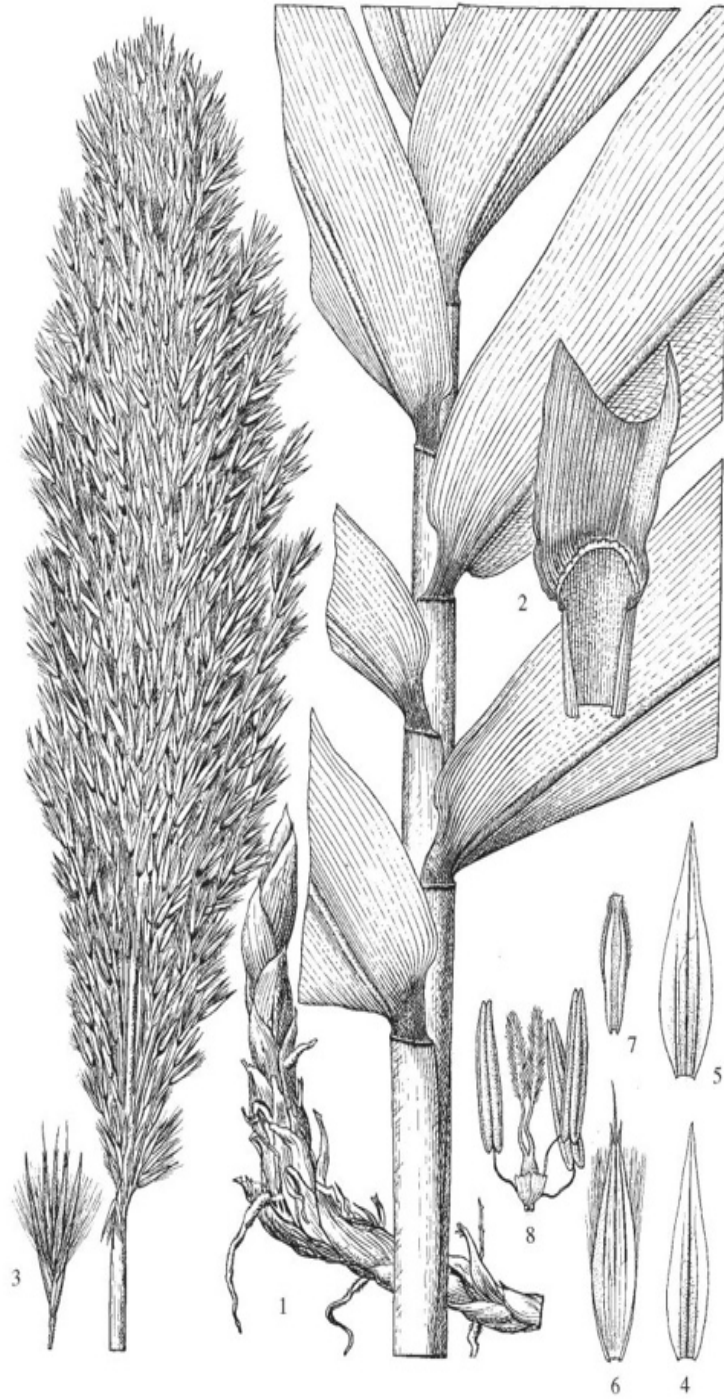


Figura 7. 1-8. *Arundo donax* Linnaeus -1. Habita. -2. Lígula. -3. Espiguilla. -4. Gluma inferior. -5. Gluma superior. -6. Lemma. -7. Palea. -8. Lodículas, estemas, y pistilo. Fuente: (eFloras, 2002)

Origen

Taiwán y Japón

Comentario autores

Arundo donax es una especie que crece en pantanos o zonas de anegación, mantiene una levada producción de biomasa, resistencia a la salinidad y la capacidad adaptativa, por lo que se considera optima para las condiciones que demanda una CCM (M. Helder et al., 2010).

Dentro de la elección de la planta para el uso en conjunto con celdas de combustible microbianas (CCM), hay un factor importante para tener en cuenta, y es su vía fotosintética. De esta forma las plantas se catalogan en tres clases,

C3, C4 y CAM, lo que en resumen indica que las plantas con ruta fotosintética C4 son las

más eficientes a comparación de las otras vías; en conjunto con una CCM-P el porcentaje de

conversión de energía solar a bioelectricidad sería mayor. Aún así, existen algunas especies de plantas C3, que exhiben una mayor eficiencia que algunas plantas C4, como es el caso de *arundo donax* (Nitorisavut & Regmi, 2017).

Brassica juncea Linneaus



Figura 8. *Brassica juncea*.

Familia

Brassicaceae

Nombre común

Mostaza india

Descripción

Es una planta herbácea anual, tiene un sistema radical el cual esta formado por una raíz principal pivotante y un gran número de raicillas secundarias fasciculadas. Posee tallos erectos ascendentes y ramificados, alcanzando una altura de alrededor de

1,5 m, esto según el ambiente donde se este desarrollando. Estas flores son hermafroditas actinomorfas provistas de un pedicelo corto. Las inflorescencias son terminales en forma de racimos. Además, los racimos pueden llegar a contener una cantidad de 50 frutos o 50 silicuas y a su vez cada planta puede tener entre 5 y 10 racimos. Las silicuas, son hispídas, con el pico aplastado y mas largo que las valvas pubescentes de 4 a 5 cm de largo por 4 a 5 mm de ancho. El fruto de esta planta es una silicua recta de 5 a 6 cm de longitud, el numero de granos por silicua es del alrededor de 20 a 25, esto depende como se cultive y, las semillas son esféricas de 2 a 2,5 mm de diámetro (SCBG Checklist, s.f.).

Origen



Figura 9. 1-4. *Brassica rapa* Linnaeus var. *Chinensis* (Linnaeus).

- 1. Porción de estema con hojas. -2. Inflorescencia e infructescencia. -3. Flor. -4. Fruto. 5-8. *B. Oleracea* Linnaeus var. *Gongylodes* Linnaeus. -5. Proximal portion of plant showing fleshy stem base. -6. Inflorescencia e infructescencia. -7. Hoja. -8. Flor con some sépalos, pétalos y stamens removed showing pistilo. 9. 10. *B. Juncea* (Linnaeus) Czernajew var. *Juncea*. -9. Flowering and fruiting branch. -10. Flower with some sepals and petals removed showing stamens y pistilo. Fuente: (Jinfeng,

1987)

Sur de Asia

Comentarios de autores

Brassica juncea es un mesófito, en una investigación llevada a cabo por Sophia et al., se observó el comportamiento de la planta, determinando que tiene la mayor variación diurna, a comparación de *Trigonella foenum-graecum* y *Canna Stuttgart*. La variación diurna está estrechamente relacionada con la variación del voltaje; es decir, la generación de electricidad depende directamente de la radiación solar, si este se ve cubierta durante el día, la generación de electricidad se reduce puesto que reduce el proceso fotosintético. Estudios han demostrado que la radiación solar

afecta los sistemas. A su vez se ha reportado que los valores de voltaje mayores se han producido a consecuencia de una mayor radiación solar (Sophia & Sreeja, 2017).

Canna lily 'stuttgart'

Familia

Cannaceae

Nombre común

Canna

Descripción

Canna es una planta grande herbácea que crece en zonas tropicales y subtropicales; es rizomatosa. Las hojas son anchas, planas y alternas; una de las características de estas plantas crece comentario en rollo largo y estrecho y luego se despide estas hojas son típicamente de color verde sólido pero algunos especies poseen otras tonalidades.



Figura 10. Canna lily 'Stuttgart'

Las flores son asimétricas y están compuestas por 3 sépalos y 3 pétalos que son pequeños y discretos; por otro lado esta especie conserva flores que son típicamente rojas naranjas o amarillas o incluso combinaciones de estos colores. Estas plantas conservan mecanismo de polinización notablemente especializado, dando paso a la autopolinización. Respecto al crecimiento de las canas este se da por tallos subterráneos hinchados, conocidos como rizoma

que almacenan almidón, siendo este es el principal atractivo de la planta para la agricultura ya que tienen los granos de almidón más grande de toda la vida vegetal (China, 2000).

Origen

Trópicos.

Comentarios de autores

Canna Lily 'Stuttgart' es una planta de raíces tuberosa considerada decorativa. En 2017 se llevó a cabo un estudio que comparó a *c. stuttgart*, *trigonella foenum-graecum* y *brassica juncea*. Demostrando que las mayores lecturas de voltaje se le atribuyen a *c. lily*; esto puede ser explicado por las raíces tuberosas, puesto que presenta mayor exudación por medio de estas, lo que a su vez incrementa la disponibilidad de materia orgánica para los microorganismos; Los exudados de las raíces están comprendidos por carbohidratos, ácidos carboxílicos, y amino ácidos, los cuales son rápidamente degradados por la comunidad microbiana lo que finalmente causa la donación de electrones, incrementando el voltaje. Esto fue congruente con los resultados observados al analizar las poblaciones microbianas de la rizosfera de la planta *canna Lily*, puesto que se encontró un alto contenido de unidades formadoras de colonias, atribuyéndoselo, una vez mas, a su estructura rizomática (Sophia & Sreeja, 2017).

Paralelo a estos resultados, se demostró también que *c. lily*, a comparación de las otras plantas compañeras de estudio, fue la que menos variación diurna presentó. Es decir, mantuvo una potencia de salida estable, llegando a una densidad de poder de 222,54 mW/m², la máxima obtenida en la investigación (Sophia & Sreeja, 2017).

Canna indica Linnaeus



Familia

Cannaceae

Nombre común

Canna

Descripción

Posee un rizoma desarrollado, muy ramificado, con tallos robustos, hasta 2,5 m.

Figura 11. *Canna indica* Linnaeus.

Vaina de la hoja verde o violeta; pecíolo corto; limbo de la hoja adaxialmente verde, abaxialmente y en el margen verde o morado, ovado-oblongo a oblongo, 30--60 × 10--20 cm. Inflorescencia en racimo de cincinni. Brácteas violeta claro, ovadas, ca. 8 mm. Flores 1 o 2 por cincinnus. Sépalos de color verde violáceo pálido, lanceolados, ca. 1,5 cm. Tubo corola amarillo albaricoque, ca. 1,5 cm; lóbulos erectos, rojo a amarillo albaricoque con ápice violáceo, lanceolados, ca. 4 cm. Estaminodios 2 (o 3), erectos, rojos con base amarillo albaricoque, oblanceolados, 4--5,5 cm × 7--10 mm, 1 con ápice emarginado; labelo rojo, a veces con manchas amarillas, lanceolado, ca. 4.5 cm, margen revoluto, ápice emarginado; estambre fértil con filamento amarillo albaricoque rojizo, lanceolado, ca. 4,2 cm; antera ca. 9 mm. Ovario verde, globoso, ca. 6 mm de diámetro, verrugoso. Estilo rojo a amarillo

albaricoque, estrecho, ca. 6 cm, base adnato a columna estaminode. Cápsula ampliamente ovoide, 1,2-1,8 cm (eFloras, 1999)



Figura 12. 1,2. *Canna xgeneralis* Bailey.– 1. Porción distal de la planta floreada mostrándola inflorescencia. -2.Flor. 3,4. *C. indica* Linnaeus. -3. Rizoma. -4. Flor. Fuente: (Shaorong & Shuqin, 1981)

Origen

Nativa de América tropical, cultivada en los trópicos.

Comentarios de autores

Algunos estudios han demostrado que algunas plantas construidas en humedales en conjunto con sistemas de celdas de combustible microbiana han sido capaces de generar electricidad al mismo, y al mismo tiempo, remover contaminantes durante los tratamientos de aguas residuales.

Plantas como *ipomoea aquatica*, *typha latifolia* y *Canna indica*,

fueron partícipes de esta investigación (Lu et al., 2015).

Otros estudios han usado otras especies que demuestran la producción de corriente asociada a la actividad en la rizósfera mediante celdas de combustible microbiana. Lo que representa a las CCM como una tecnología ampliamente versátil para diversas funcionalidad y a su vez la producción de energía eléctrica.

En el en conclusión Lu et al, demostró que *c. indica* tiene la capacidad para crecer en conjunto con comunidades microbianas y así formar la celda de combustible microbiana capaz de producir electricidad. Además concluyeron que las condiciones oligotróficas del ecosistema limita la competición de bacterias aeróbicas frente a la actividad de las bacterias electroquímicamente activas, incluidas las actividades metanogénicas de la rizósfera, los cuales podrían ser beneficiosos para la producción de corriente en celdas de combustible microbianas (Lu et al., 2015).

Chasmanthe floribunda



Familia

Iridaceae

Nombre común

Lirio cobra

Descripción

Es una planta que crece y prospera en lugares húmedos y mojados. El chasmante erige hojas en forma de espada de hasta 2 metros de largo; se producen anualmente a partir de un cormo. La espiga de la floración generalmente no está ramificada

Figura 13. *Chasmanthe floribunda*. Fuente: (Goldblatt, 2020) con muchas flores grandes en forma de trompeta. Se produce a partir de bulbos grandes y pequeños. Los bulbos cortos, anchos y carnosos, por lo que proporcionan un hábitat para el desarrollo de microbios que dependen de los rizodepósitos (Azri et al., 2018).

Origen

Sudáfrica

Comentarios de autores

Chasmanthe floribunda generalmente crece en los jardines como una planta ornamental. En un estudio llevado a cabo en el 2018, se comparó la producción de bioelectricidad usando *chasmanthe floribunda*, *chlorophytum comosum* y *cyperus papyrus*; los cuales generaron 390, 780 y 650 mV respectivamente, demostrando la presencia de actividad microbiana capacitada para generar carga.

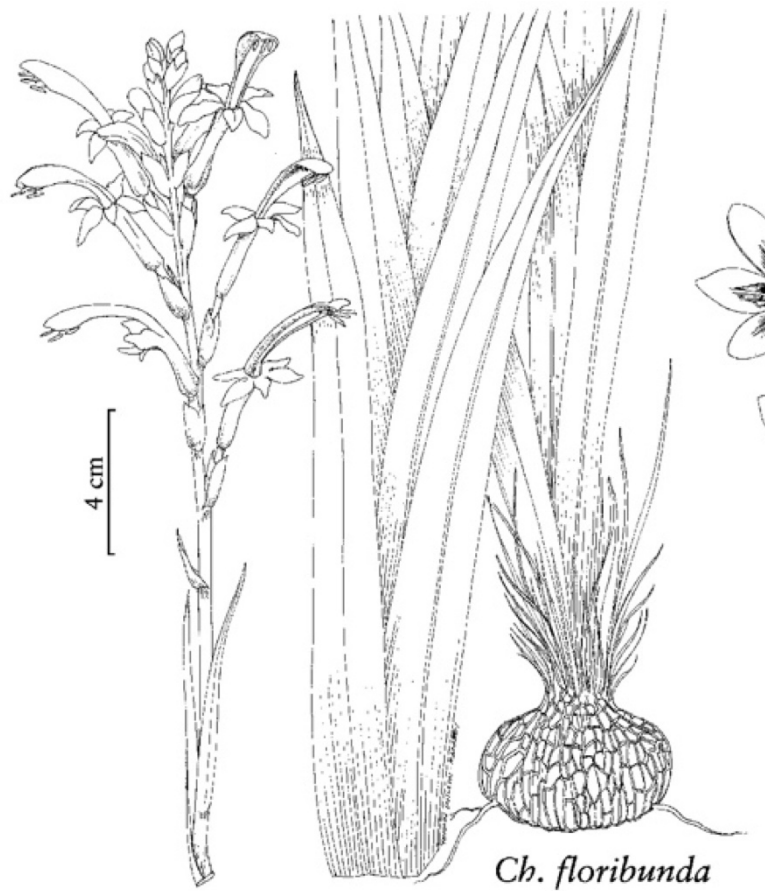


Figura 14. Figura simplificada de *Chasmanthe floribunda*. Fuente: (Wilson-Ramsey, 2018)

Por otro lado, cabe resaltar el comportamiento fotosintético de las plantas; es bien entendido que la eficiencia fotosintética de las plantas C4 es 50% mas eficiente que las plantas C3; sin embargo, en la investigación de Azri et al., demostró que la especie *cyperus papyrus*, una planta C4, obtuvo un potencial menor a comparación de *c. floribunda* y *chlorophytum comosum*, ambas plantas C3 (Azri et al., 2018).

Chlorophytum comosum Thunberg

Familia

Liliacea

Nombre común

Cinta, lazo de amor

Descripción

La planta es una pequeña hierba que crece con un



Figura 15. *Chlorophytum comosum*.

rizoma tuberoso, en donde sus raíces primarias son carnosas, engrosadas y fusiformes. Es una planta hortícola de hojas perennes; basales, subdistichous o fasciculadas, sésiles o pecioladas, usualmente lineales a elíptico-lanceoladas, conduplicadas, con revestimiento de base. Inflorescencia en racimo o panícula terminal; brácteas pequeñas. Flores bisexuales; pedicelo articulado. El perianto suele ser blanco; tépalos 6, libres, 3-7-nervados, persistentes o marcescentes. Estambres 6, insertados en la base de los tépalos; filamentos filiformes, generalmente ligeramente ensanchados cerca de la mitad; anteras casi basifijas, intrusas. Ovario de 3 lóbulos; óvulos 1 a varios por lóculo. Estilo esbelto; estigma pequeño. Fruto en cápsula, loculicida agudamente en 3 ángulos. Semillas recubiertas de negro, aplanadas (Tamura, Smith, Hooker, & Smith, 2000).

Origen

Sudáfrica

Comentarios de autores

Chlorophytum comosum es una planta con un alto valor ornamental (Tou et al., 2019);



Figura 16. Figura de *Chlorophytum comosum*. Fuente: (Conroy, 2011)

se caracteriza por una alta biomasa y un cultivo sencillo, y a su vez, cuenta con la capacidad de crecer en una amplia diversidad de climas que varían en condiciones de luz y temperatura; incluso, se ha observado que crece bien en regiones que se experimenta altos niveles de luz diurna. De esta forma, el estudio llevado a cabo por Azri et al., demostró que esta planta tiene la capacidad de mantener una comunidad de microorganismos dentro de una celda de combustible microbiana y así producir bioelectricidad. Dicho de otra forma,

su alta actividad microbiana en la rizosfera le otorgó a *c. comosum* los valores más altos de voltaje, alcanzando 780 mV; Esta es una planta clase C3, al igual que *chamasnthe floribunda*, las cuales obtuvieron mejores resultados a comparación de *cyperus papyrus*, una planta C4 (Azri et al., 2018). En general una planta C4 es mejor, pero algunas investigaciones han demostrado especies C3 con mayor eficiencia (Tou et al., 2019).

Pamintuan et al., llevaron a cabo una investigación basada en el potencial de bioelectricidad generado en celdas de combustible microbianas aplicadas a plantas que crecen en interiores. Entre las plantas estudiadas se encuentra *c. comosum*, *portulaca oleracea*, y *dieffenbachia amoena*; concluyendo en la demostración de que, aunque todas produjeron bioelectricidad, *c. comosum* obtuvo la densidad de potencia más alta de las tres plantas. También comentan que para continuar incrementado el voltaje en el circuito y a su vez la corriente, para todas las plantas, se debe tener en cuenta que estas deben madurar y adaptarse al suelo (Pamintuan, Calma, Feliciano, & Lariba, 2020).

Se ha comentado, de igual forma, que esta planta cuenta con una importante producción de oxígeno, además de una conductividad eléctrica significativa correlacionada a su alta tolerancia y acumulación de cadmio. Tiene una excelente habilidad para aclimatar su proceso fotosintético en un rango de temperatura de 10 – 35°C; también tiene la capacidad de crecer en condiciones de anegación, y por último, se le atribuye que no cuenta con el fenómeno de fotorespiración cuando las condiciones climáticas se tornan calientes o secas (Tou et al., 2019).

Dentro de la investigación sobre la caracterización de la celda de combustible microbiana con Chlorophytum, llevada a cabo por Tou et al., se pudo concluir como la actividad electrogénica decrecía durante la noche y se mantenía hasta la mañana, cuando la luz y la temperatura aumentaba y consecuente con eso, la actividad fotosintética. Sin embargo, los valores se mantienen bajos a comparación de otras investigación (Tou et al., 2019).

Cyperus involucratus Rottboll



Familia

Cyperaceae

Nombre común

✓ Cebolleta (Cuba)

✓ Ermandelgras

(Alemania)

✓ Nutsedge yellow

(Estados Unidos)

✓ Tiririca - amarela (Brasil)

✓ Coquillo, coyolito,
coquito (Centroamérica)

✓ Chufa común (España)

✓ Cipero dulce (Italia)

Descripción

Son hierbas anuales,

de mayor frecuencia, perennes a través de rizomas, monoicas o muy singularmente dioicas.

Figura 17. *Cyperus involucratos* Rottboll.

Los tallos son de sección triangular, con menos frecuencia cilíndricos, y en otras ocasiones se encuentran comprimidos, a su vez, el parénquima es muy laxo, debido a que aparenta ser hueco. Por otro lado, las hojas alternas, usualmente están agrupadas en una roseta basal, que con frecuencia

se disponen en tres hileras o simples, también poseen envainadoras, con vaina generalmente cerrada y esta lámina por lo general acentuada, y poco usual filiforme, y en otras ocasiones inexistentes, con los nervios paralelos. Las flores son unisexuales o hermafroditas, inconspicuas, son perfectas o a menudo imperfectas, generalmente son monoicas, sésiles en las axilas de brácteas (glumas) dispuestas en espiral o dísticas, la cuales forman espigas o espiguillas que son solitarias o terminales, pero a menudo forman varios tipos de inflorescencias secundarias umbeliformes, racemiformes o capiliformes (eFloras, 1997).



Figura 18. 1-7. *Cyperus involucratus* Rottboll [*C. alternifolius* Linnaeus subsp. *flabelliformis* Kükenthal]. -1. Parte de la planta. -2. Inflorescencia. -3. Espiguilla. -4. Gluma. -5. Nutlet. -6. Estilo y estigmas. -7. Estamen. Fuente: (Chunrong & Ronghou, 1961)

Origen

Nativa de África y Asia, la península de Arabia.

Comentarios de autores

C. involucratus es una planta que demuestra la capacidad de crecer en varios entornos, haciendo sencillo su uso y cultivo. Un estudio llevado a cabo por Klaisongkram y Holasut, demostró que las CCM aplicadas al *Cyperus involucratus* puede producir una densidad de potencia media. Por lo que concluyen y recomiendan una mayor investigación de las especies vegetales (Klaisongkram & Holasut, 2015). La diversidad de estas representa una diversidad en las configuraciones de CCM-P.

Dracaena braunii Engl.

Dracaena litoralis Mwachala & Eb. Fisch

Dracaena sanderiana Sander ex Mast

Familia

Asparagaceae

Nombre Común

Bambú de la suerte

Descripción

Esta planta posee tallos leñosos los cuales están segmentados por nudos, sus hojas son alargadas, opuestas y lanceoladas de color verde; la primera hoja de las plántulas no presentan lámina. Por otro



Figura 19. *Dracaena braunii*.

lado, las flores presentan 3 lodículas y un androceo con 6 estambres, el ovario posee 2 o 3 estigmas y muy pocas veces uno (Damen, van der Burg, Wiland-Szymańska, & Sosef, 2018).

Origen

Camerún, Guinea ecuatorial, República del Congo.

Comentarios de autores

Esta especie tiene una característica en sus flores, pues son nocturnas, y solo mantiene unas pocas horas en antesis completa. De esta planta se aprovecha las flores, por esta razón, en el cultivo, donde normalmente los niveles lumínicos son considerablemente más bajos,

ocasiona una antesis completa más temprano durante la noche. Este fenómeno explica la diferencia en el tamaño de sus flores. Un estudio realizado por Damen et al., analizó el



Figura 20. *Dracaena braunii*.

comportamiento de esta especie en campo, y concluyó que estas especies resultan ser muy polimórficas, lo que puede ser causado por las condiciones extremas en las que se desarrollan, como lo son lugares salados, cercanos a costas; marismas (Damen et al., 2018). De esta forma, *d. braunii* ya sea en suelo o superficies hidropónicas, demuestra una considerable capacidad para producir biomasa y a su vez, producir energía; un tipo de planta de bajo mantenimiento, la cual no requiere exposición de luz directa (Sarma & Mohanty, 2018).

Sarma et al., realizó una investigación comparando dos especies de plantas de interior y su capacidad de producir energía. *Dracaena braunii* y *epipremnum aureum* demostraron ser capaz de producir bioelectricidad, y a su vez, mantener la vitalidad de la planta (Sarma & Mohanty, 2018).

Eichhornia crassipes Mart.



Figura 21. *Pontederia crassipes* Mart.

Pontederia crassipes Mart.

Familia

Pontederiaceae

Nombre común

Jacinta de agua

Descripción

Es una hierba acuática perenne, de tallos cortos, flotantes o enraizados en el barro, rizomatosos o estoloníferos, enraizados desde los nudos; raíces largas, a veces oscuras

debido a su antocianina púrpura, colgante; hojas en roseta; pecíolos esponjosos, en ejemplares jóvenes cortos y con hinchazón unilateral o inflado pero hasta 30 cm de largo cuando son mayores, afinándose y estrechándose desde la base bulbosa hasta el punto de unión con la lámina; lámina circular a riñón, lisa brillante, de 4 a 15 cm de largo y ancho; inflorescencia en espigas con alrededor de ocho flores, pedúnculos largos, bibracteados, la bráctea inferior con vaina larga y lámina pequeña, la superior casi totalmente incluida dentro de la vaina de la inferior, tubular con una pequeña punta puntiaguda (apiculada); parte del raquis que tiene flores de hasta 15 cm o menos de largo; todo el escape puede ser de 30 cm; perianto de seis lóbulos, unidos en la parte inferior en un tubo estrecho, lila, púrpura azulado

o blanco, el lóbulo superior con una mancha violeta con centro amarillo; cápsula membranosa, trilocular, dehiscente, con muchas semillas, hasta 50 o más por cápsula; semilla ovoide, acanalada, de 0,5 a 1 mm. La especie se distingue por la hinchazón o inflación casi unilateral del pecíolo, su pico bibracteado de pedúnculo largo y su perianto superior manchado de amarillo en el centro (eFloras, s.f.).

Origen

Nativa de Brasil

Comentarios de autores

Esta planta ha sido registrada en estudios anteriores, puesto que posee propiedades remediadoras de aguas contaminadas con metales pesados (Venkata Mohan et al., 2011) (Sarma & Mohanty, 2019), además de las ventajas al ser de fácil cultivo y hábil para crecer en agua y humedales. Así mismo, no es una limitante agregar el sistema de una celda de combustible microbiana, y así, producir energía (Kabutey et al., 2019) (Pamintuan et al., 2020).

Widharyanti et al., lideró un estudio para la producción de energía sostenible y a su vez biomasa; De esta forma demostró el potencial aplicativo de las CCM en estos procesos. El uso de Jacinto de agua indicó tener un alto potencial para ser usada en CCM, puesto que

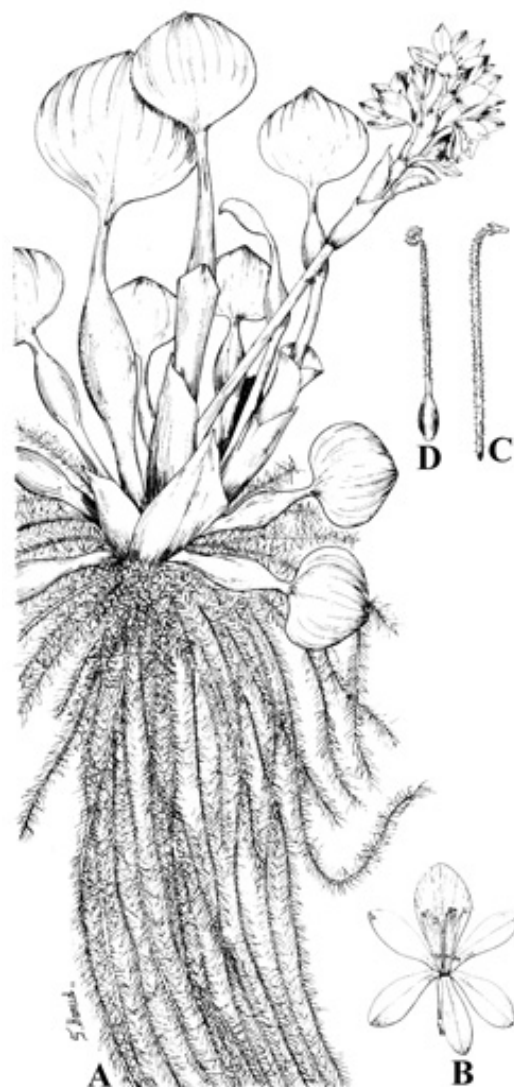


Figura 22. *Eichhornia crassipes*. A. Habitat. B. Flor C. Antera D. Carpel.

obtuvo un buen proceso al convertir la energía química del substrato en energía eléctrica, adicionando el potencial a desarrollar esta biotecnología en áreas subdesarrolladas (Widharyanti et al., 2020).

Epipremnum aureum Lind. & Andre



Epipremnum pinnatum cv. Aureum

Familia

Araceae

Nombre común

Potos

Descripción

Es una liana que puede llegar a medir los 20 metros de altura, y contar con tallos de hasta 4 cm de diámetro. Es capaz de trepar mediante raíces aéreas que se enganchan a las ramas de los árboles. Sus hojas son perennes, alternas y acorazonadas; enteras en las plantas jóvenes, pero irregularmente

Figura 23. *Epipremnum aureum* Lind. & André

pinnadas en las maduras, de incluso 1 metro de largo por 45 cm de ancho, mientras que en plantas jóvenes no superan los 20 cm de largo. Posee una particularidad basada en su floración, puesto que muy rara vez se produce, ya sea en medio natural o cultivada (Bunting, 1964).

Origen

Descrita de las Islas Solomón

Comentarios de autores

E. aureum es una especie vegetal que tienen la característica de crecer muy bien tanto en el suelo como en medios acuáticos, y a su vez, producir mucha biomasa, lo que la hace adecuada para la investigación dentro de celdas de combustible microbianas. Además de tener un valor agregado por ser plantas de interior domésticas, famosas por su capacidad de purificar el aire interior, y a su vez, no necesitar luz solar directa; no tiene competencia con la producción de alimentos, y cuenta con el beneficio de la capacidad para la generación de bioelectricidad (Sarma & Mohanty,



Figura 24. *Pothos aurea*. Fuente: (Lemaire, 1854-1896)

2019). La investigación llevada a cabo por Sarma y Mohanty demostró que la alta capacidad de crecimiento que posee *e aureum* puede tener un efecto directo en la alta generación de bioelectricidad, esto en comparación con *D. Braunii* (Sarma & Mohanty, 2018).

Glyceria máxima (Hartman) Holmberg

Glyceria aquatica (Linnaeus) Wahlberg

Glyceria spectabilis

Poa aquatica Linnaeus

Familia

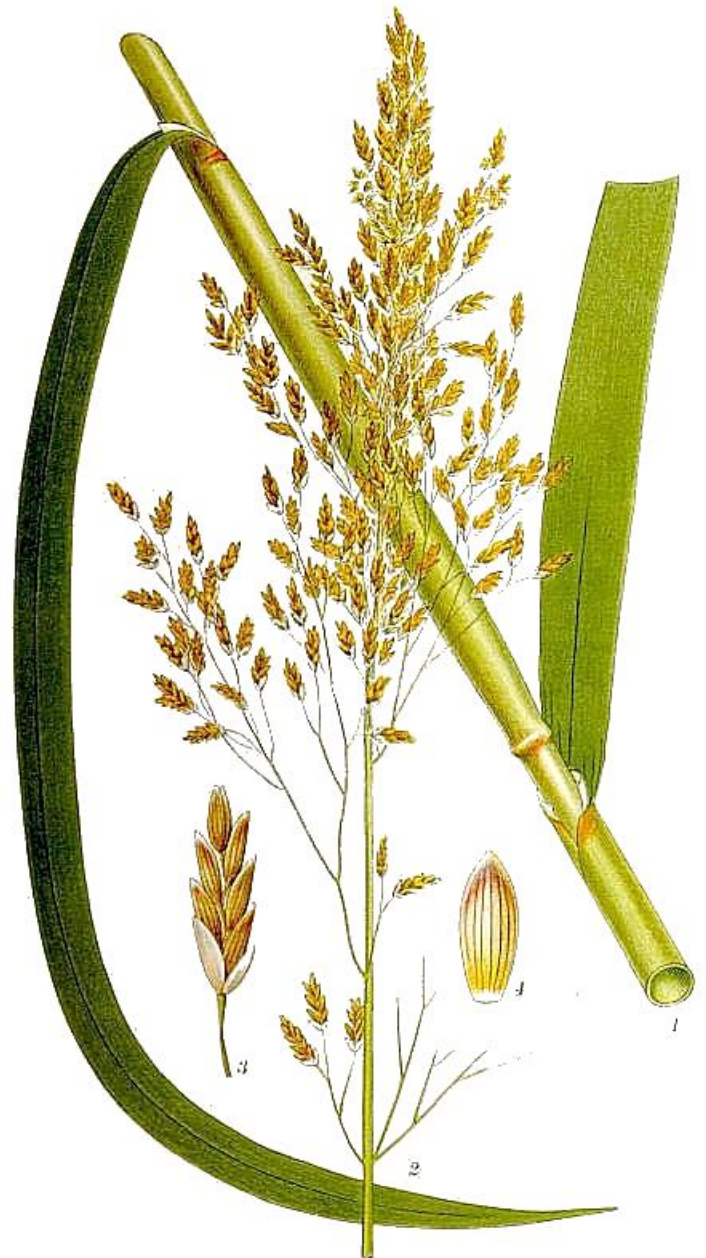
Poaceae

Nombre común

Hierba dulce de caña

Descripción

Es una especie perenne, rizomatosa; pues son largos, e incluso gruesos. Calmos robustos, erectos, de masomenos 80 a 200 cm de altura, y de un diámetro de 10 mm. Las vainas de las hojas suaves apuntan hacia el limbo; láminas foliares plantas de verde claro, con nervaduras transversales, una superficie abacial escábrida, y su superficie adagial es lisa o poco escábrida; su ápice es agudo. Espiguillas estrechamente oblongas, de una tonalidad verde amarillenta o violáceo (eFloras, 1919).



JÄTTEGRÖE, GLYCERIA MAXIMA (HARTM.) HOLMB.

Figura 25. *Glyceria maxima*

Origen

Kazajistán, Rusia, Europa.

Comentario autores

Glyceria máxima fue una de las especies pioneras, junto con *spartina anglica* (Ruud A. Timmers et al., 2010) (Nitorisavut & Regmi, 2017), que se usó para las primeras celdas de combustible microbianas aplicadas a plantas; esto representó el primer ejemplo de generación de bioelectricidad (Ruud A. Timmers et al., 2013) (Kabutey et al., 2019). *G. maxima* es una de las especies que pueden crecer en sedimentos anaeróbicos (R. A. Timmers et al., 2012), lo que le atribuye la característica perfecta, puesto que estas condiciones anaeróbicas son requeridas en el compartimiento anódico (Strik et al., 2008).

Lolium perenne Linnaeus



Figura 26. Lolium perenne.

Familia

Poaceae

Nombre común

Césped inglés

Descripción

Esta planta posee tallos de hasta 80 cm, con hojas de color verde oscuro y brillante, del tipo enteras o a veces bilocadas, cuentan con un limbo de hasta 18 cm de longitud; estriadas y con la nervadura central marcada. La

inflorescencia está compuesta por espigas sésiles alternadas a izquierda y derecha de un eje central. Las espiguillas que se encuentran dispuestas juntas, cuentan con 3 a 10 flores cuya pálea es tan larga como el lemma. Así como la mayor parte de la familia de las gramíneas, su reproducción suele darse por semillas o por macollos (Linnaeus, 1753).

Origen

Rusia, Europa.

Comentarios autores

Lolium perenne tiene la capacidad de desarrollar biomasa de una forma rápida, además de contar con un sistema de raíces denso en la rizosfera, incluyendo el gran potencial para la remediación de contaminantes. Estas razones fueron tomadas en cuenta para un estudio sobre la aplicación de las celdas de combustible microbianas en plantas en paralelo con la remediación de metales pesados; concluyendo en primera instancia la remoción de contaminantes, sea en agua o suelos; y a su vez, la generación de energía (Habibul et al.,

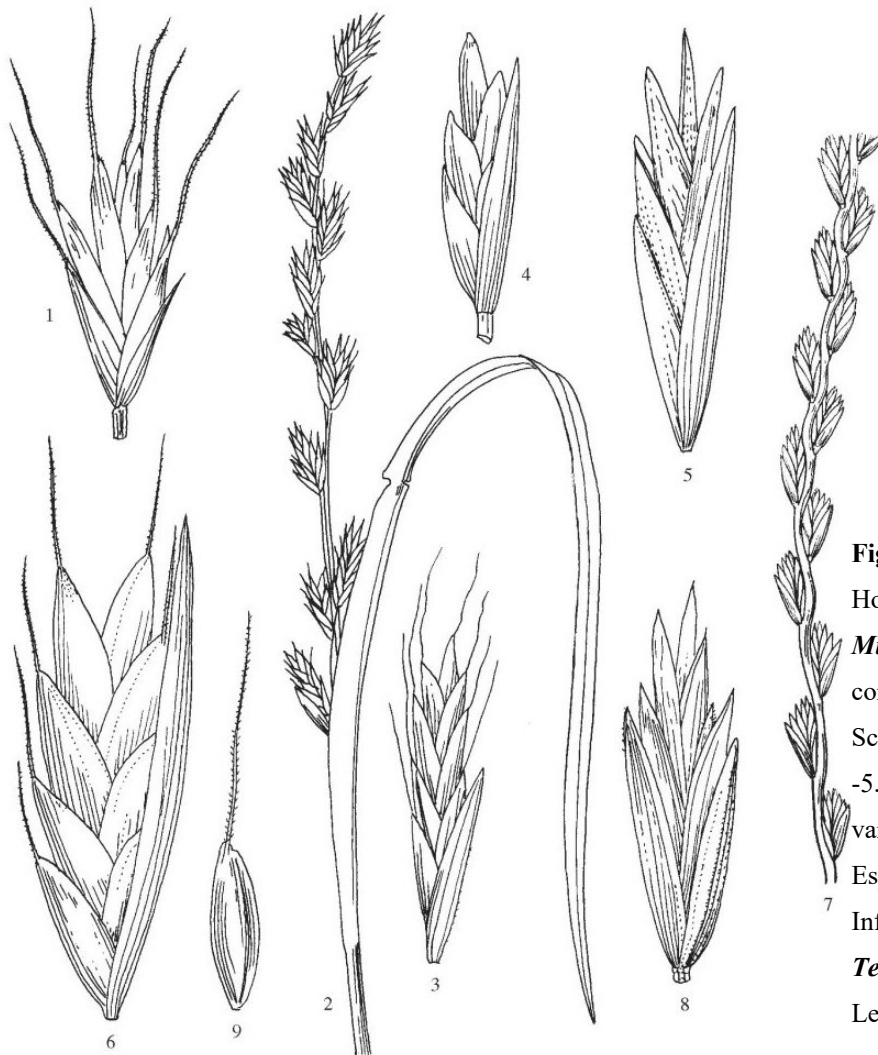


Figura 27. 1. *Lolium persicum* Boissier & Hohenacker. -1. Espiguilla. 2-3. *L. Multiflorum* Lamarck. -2 Inflorescencia con una hoja. -3. Espiguilla. 4. *L. Remotum* Scrank. -4. Espiguilla. 5. *L. rigidum* Gaudin. -5. Espiguilla. 6. *L. Temulentum* Linnaeus var *arvense* (withering) liljeblad. -6. Espiguilla. 7-8. *L. Perenne* Linnaeus. -7. Inflorescencia. -8. Espiguilla. 9. *L. Temulentum* Linnaeus var *temulentum*. -9. Lemma. Fuente: (Ping, 1959)

Oryza sativa Linnaeus



Familia

Poaceae

Nombre

común

Arroz

Descripción

El

arroz es una

Figura 28. Oryza sativa.

planta anual que cuenta con tallos de aproximadamente 40 a 150 cm de alto. Posee vainas glabras, lígula de 7 a 30 mm de largo, glabra; láminas glabras. Inflorescencias en panículas, laxamente contraídas, lema fértil; escabrosa sobre y entre las nervaduras, sin arista o con una arista de hasta 7 cm de largo; y posee anteras amarillas (Linnaeus, *Oryza sativa*, 1753).

Origen

Asia

Comentarios autores

Oryza sativa es una planta que ha sido reportada desde el inicio de la investigación, puesto que a los arrozales se les ha aplicado las celdas de combustible microbianas (Arends et al., 2012), para estudiar la sinergia entre producción de arroz (Kaku et al., 2008) y bioelectricidad (K. Wetser et al., 2017). Algunos estudios han evaluado su ecosistema microbiano en la rizosfera, con la finalidad de conocer más el comportamiento de la planta

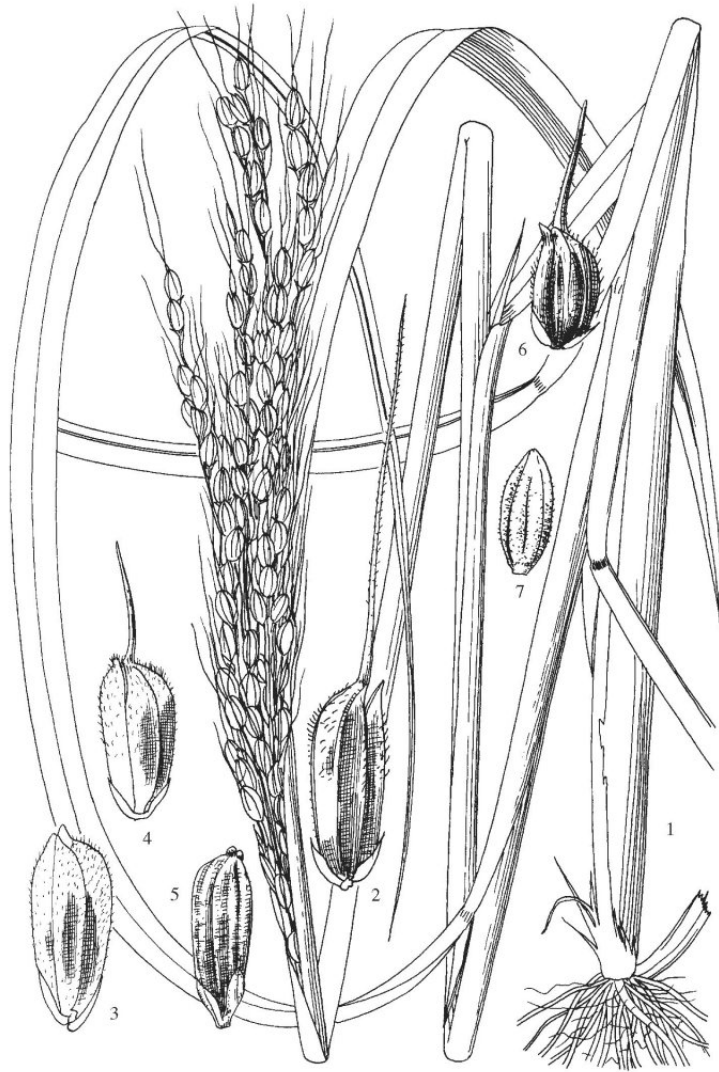


Figura 29. 1-4. *Oryza sativa* Linnaeus. -1. Habitad. -2-4. Espiguillas. 5. *O. glaberrima* Steudel. -5. Espiguilla. 6. *O. officinalis* Wallich ex Watt. -6. Espiguilla. 7. *O. meyeriana* Baillon *granulata*. -7. Espiguilla. Fuente: (Ping C. &, 2002)

en la cámara anódica y así generar, in situ, mayor registros de potencia (Takanezawa et al., 2010). Incluso se demostró que la presencia del ánodo en el arrozal podía reducir o disminuir la producción de metano, lo que, en un inicio llevó a la idea de reducción de emisiones de los arrozales por medio de esta tecnología (Cabezas et al., 2015). Sin embargo, se debe tener presente que las plantas acuáticas se caracterizan por ser sensibles a los cambios en la conductividad (Kothapalli, 2013).

Puccinellia distans (Jacquin)

Familia

Poaceae

Nombre común

Alkaligrass (Europa)

Descripción

Esta especie perenne, presenta un copete, verde pálido. Calmos erectos o



Figura 30. *Puccinellia distans*.

geniculados; lígula truncada o dentada. Respecto a sus hojas, resultan ser planas o conduplicada, con una superficie abacial escábrida. Panícula abierta, extendidas horizontalmente o reflejadas, con una parte inferior desnuda, escábrida. Espiguillas de 4 a 6 mm, flósculos; glumas obtusas, nervada, base pubescente, ápice truncado o redondo; además de unas anteras de aproximadamente 0,5 a 0,8 mm (eFloras, 1848).

Origen

Eurasia

Comentarios de autores

En 2018, Khundzari et al., realizó una investigación para determinar los efectos de la salinidad en el crecimiento de las plantas, además de factores consecuentes a la producción de bioelectricidad usando CCM con *puccinellia distans*. Esta especie de planta fue seleccionada por su alta tolerancia salina, y su capacidad para desarrollarse en zonas

inundadas, así como en suelos duros con un drenaje pobre. Así mismo, el estudio demostró la producción de bioelectricidad por periodos cortos, puesto que se necesita fuentes de carbón adicional para sostener la alta producción de energía (Md Khudzari et al., 2018).

Además, es importante resaltar que la producción de potencial incrementa cuando se

incrementan los niveles de salinidad, sin embargo al aumentar la salinidad en el medio, no necesariamente se incrementa la producción (Md Khudzari et al., 2018). Lo que podría ser a causa de que la planta conserva hasta cierto punto la energía realizada para un proceso y no se sobreesfuerza, a menos de que su entorno lo exija, llevándola a adaptarse; más investigación es requerida para aceptar esta idea.

De igual forma, la producción de potencial a partir de condiciones salinas son mejores en comparación de las condiciones no salinas. El estudio demuestra la importancia y necesidad de plantas vivas para llevar

a cabo la producción de energía a partir de celdas de combustible microbianas. Esto a raíz de

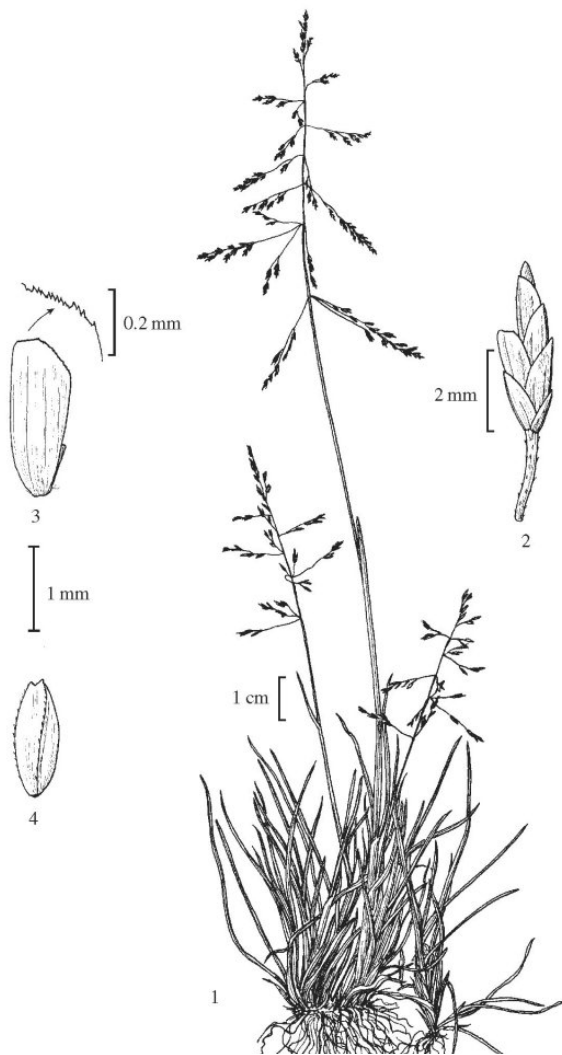


Figura 31. 1-4. *Puccinellia distans* (Jacquin) Parlato. -1.

Habitad. -2. Espiguilla. -3. Lemma con rachilla. -4. Palea.

Fuente: (Barkworth, 2007).

que *p. distans* demostró tener una alta tolerancia a la salinidad, creciendo sin problemas frente a los diferentes niveles de sal expuestos, incluso, fueron benéficos para el crecimiento de la planta; esto en comparación con las plantas en condiciones no salinas. Sin embargo, hay que tener presente que un ambiente salino puede afectar negativamente las bacterias electroquímicamente activas, causando un decrecimiento y posible fallo del sistema de producción de energía (Md Khudzari et al., 2018).

Especies *Sedum*



Figura 32. Sedum album.

Familia

Crassulaceae

Descripciones

Sedum album Linnaeus

Esta especie de hierba perenne; laxo cepitosas, puberulentas, papilosas. Posee tallos rastreros y cortos ascendentes, muy ramificados, sin rosetas. Sus hojas son alternas, patentes o adpresas, sésiles; su limbo es verde, aunque a menudo se torna rojizo, no glauco, lineal y ovalado; base escasamente espuela, no escamosa, ápice obtuso o redondeado; sus brotes florales

son erectos, simples o ramificados; consta de láminas foliares lineales a ovadas. Inflorescencias cimas paniculadas, ramificadas; ramas reflejadas, bifurcadas; brácteas similares a las hojas, más pequeñas. Esta especie se informó por primera vez en Estados Unidos (eFloras, 1753).

Sedum sexangulare Linnaeus

Es una hierba perenne, laxamente cespitosa, matificantes y glabras. Sus tallos son ascendentes, ramificados, rin rosetas. Sus hojas son generalmente en seis filas, ascendentes, sésiles. Su limbo es verde brillante, no glauco, lineal. Así como s. álbum, sus brotes florales son erectos, simples o ramificados. Cuenta con láminas foliares lineales, y en su base con espuelas; sus inflorescencias son moderadamente laxas. Es una planta ramificada, con ramas extendidas, a veces bifurcadas. Posee filamentos, anteras y escamas de néctar, amarillas (eFloras, 1753).

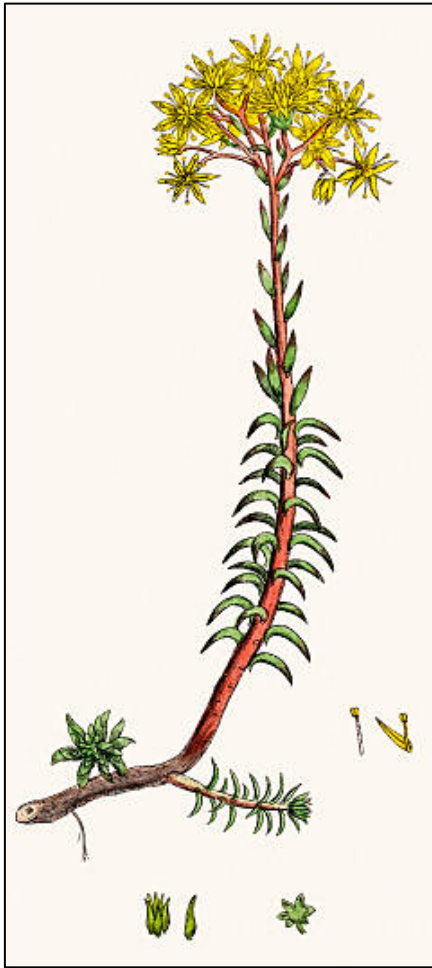


***Sedum reflexum* Linnaeus**

Como la familia sedum, es una hierba perenne, con copetes, glabras. Sus tallos son procumbentes, enraizados, simples, con rosetas. Con respecto a sus hojas, estas son alternas, ascendete, sésiles; cuenta con un limbo verde, a veces glauco lineal a oblongo. Mantiene brotes florales erectos o ascendentes, caídos cuando son jóvenes, simples. Láminas foliares lineales, con una base espueleada. Ramas recurvadas, no bifurcadas; brácteas similares a las hojas. Pedicelos ausentes; sépalos erectos, amarillentos con ápice agudo-acuminado. Carpelos erectos en fruto, distintos, marrones (eFloras, 1753).

Figura 33. *Sedum sexangulare*

Comentarios de autores



Una investigación llevada a cabo por Tapia et al., en el 2017, evaluó la capacidad de las celdas de combustible microbianas aplicadas a siete diferentes tipos de plantas del genero *sedum*, en un ecosistema semiárido, esto con la finalidad de expandir las aplicaciones para las CCM-P (Tapia et al., 2017).

El genero *sedum* se ha estudiado anteriormente por sus bajos requerimientos de agua y resistencia a las sequías, esto debido a su vía fotosintética, CAM. Entre las especies que se estudiaron, *Sedum album* Linnaeus, *Sedum hybridum*, *Sedum kamtschanticum*, *Sedum reflexum*, *Sedum rupestre* Linnaeus, *Sedum sexangular* e, *Sedum spurium*; se encontró que *s. hybridum* obtuvo

la mayor densidad de potencial, seguido por *s. rupestre*. Además se observó que el uso de diferentes especies *sedum* otorgó una variación en la composición de los exudados; lo que causaría una variación en las comunidades microbianas participes en el ánodo de la CCM (Tapia et al., 2017)..

Figura 34. *Sedum reflexum*.

Aun cuando las densidades de potencial obtenidas en el estudio fueron bajas, a comparación de las previamente reportadas, se pudo observar la relación entre el contenido de agua en el sustrato y la energía generada. Esto abre la posibilidad de usar como un indicador de contenido de agua en el suelo (Tapia et al., 2017).; es bien sabido que se requiere más información e investigación para conocer su comportamiento en estas zonas áridas.



Figura 35. *Sedum spurium*



Figura 36. Sedum rupestre.

Spartina anglica C.E.Hubbard, Bot.

Spartina townsendii H Groves & J. Groves var. *anglica*

Familia



Poaceae

Nombre común

Espartina, pasto común

Descripción

Esta especie perenne de rizomas suaves y carnosos se enraíza profundamente. Tiene calmos que forman grupos grandes y erectos de maso menos 10 a 120 cm de altura, sus vainas de las hojas lisas, en su mayoría, son más largas que los entrenudos; láminas foliares lineales, planas o enrolladas hacia arriba, lisas, ápice fino, duras, láminas superiores generalmente permeables. Posee racimos

dispuestos racimosamente; rígidos, erectos o ligeramente extendidos, con espiguillas superpuestas estrechamente. Conserva un raquis que termina en una cerda dura, con

espiguillas pubescentes. Esta es una especie realmente vigorosa, puesto que surgió en Inglaterra a finales del siglo XIX por la hibridación natural de *s. alterniflora* y *s. marítima*, entre otros factores. Se suele extender por zonas costeras (eFloras, 1978).

Origen

Reino Unido, Canadá, Estados Unidos.

Comentarios de autores

El género *spartina* tiene exclusivamente la ruta fotosintética C4 y es el principal colonizador de las marismas costeras (Long, 1999); ha sido estudiada y ha demostrado ser capaz de sobrevivir y producir electricidad en una celda de combustible microbiana sin ser letal para la propia planta; esto se debe a que *s. anglica* es capaz de transportar una cantidad substancial de oxígeno desde sus raíces por medio del aerénquima (Ruud A. Timmers et al., 2010); lo que es característico de plantas que se desarrollan en zonas de anegación, es decir, es capaz de crecer en zonas inundadas.

En la investigación de Timmers et al, sus razones para escoger *spartina anglica* se basaron en cuatro puntos: I. No tiene competencia por tierra cultivable. II. Mantiene una alta producción de biomasa. III. Se encuentra, mundialmente, en zonas de marismas o pantanos. IV. Es tolerante a la salinidad, lo que ofrece una oportunidad para operar el sistema con alta fuerza iónica (Ruud A. Timmers et al., 2010). De esta forma, en la investigación de Helder et al., el máximo poder de densidad fue obtenido por *spartina anglica* con 222 mW/m², en contraste con *arundinella anomala*, que obtuvo 22 mW/m². (M. Helder et al., 2010). Cabe destacar que *spartina anglica* es un halófito, es decir es una planta adaptada a crecer en condiciones salinas, a comparación de *a. hirta* (*a. anomala*) que es una especie de agua dulce.

Las condiciones saladas proveen iones de forma abundante a las celdas, lo que facilita el transporte a través de la membrana (M. Helder et al., 2010).

Así mismo, en una investigación consecuente de Helder et al., se estudia el medio en el que crece las raíces, y también, se sitúa el ánodo; esto con el fin de incrementar la potencia de salida. Se determinó en primera instancia que un buffer a base de fósforo influencia de forma negativa el crecimiento de la planta, además de que la densidad de corriente puede ser incrementada al remplazar el nitrato por bicarbonato de amonio en el medio de crecimiento de las raíces (M. Helder et al., 2012).

Consecuente con esto, en un estudio sobre la resiliencia de las celdas de combustible microbianas durante el invierno neerlandés, se identificó a *S. anglica* como una especie que tolera el frío por debajo de los 5°C; aún así, se especifica que la mayoría de las plantas experimentan estrés cuando la temperatura decae por debajo de cero, llevándolas a morir (Marjolein Helder et al., 2013).

La mayor potencia máxima alcanzada con *S. anglica* fue de 679 mW/m² (Chicas et al., 2018).

El uso de celdas de combustible microbianas en sinergia con *S. anglica* puede proveer la máxima generación de poder durante la remoción de contaminantes. No obstante, los cultivos de arroz son las especies de plantas preferidas con el mérito de tener un fácil acceso, adecuada dureza y flexibilidad al crecer bajo diferentes condiciones en diferentes zonas ecológicas (Kabutey et al., 2019).

En conclusión, *Spartina anglica* ha demostrado ser una planta ideal para la implementación y generación de bioenergía en los humedales (Sarma & Mohanty, 2019).

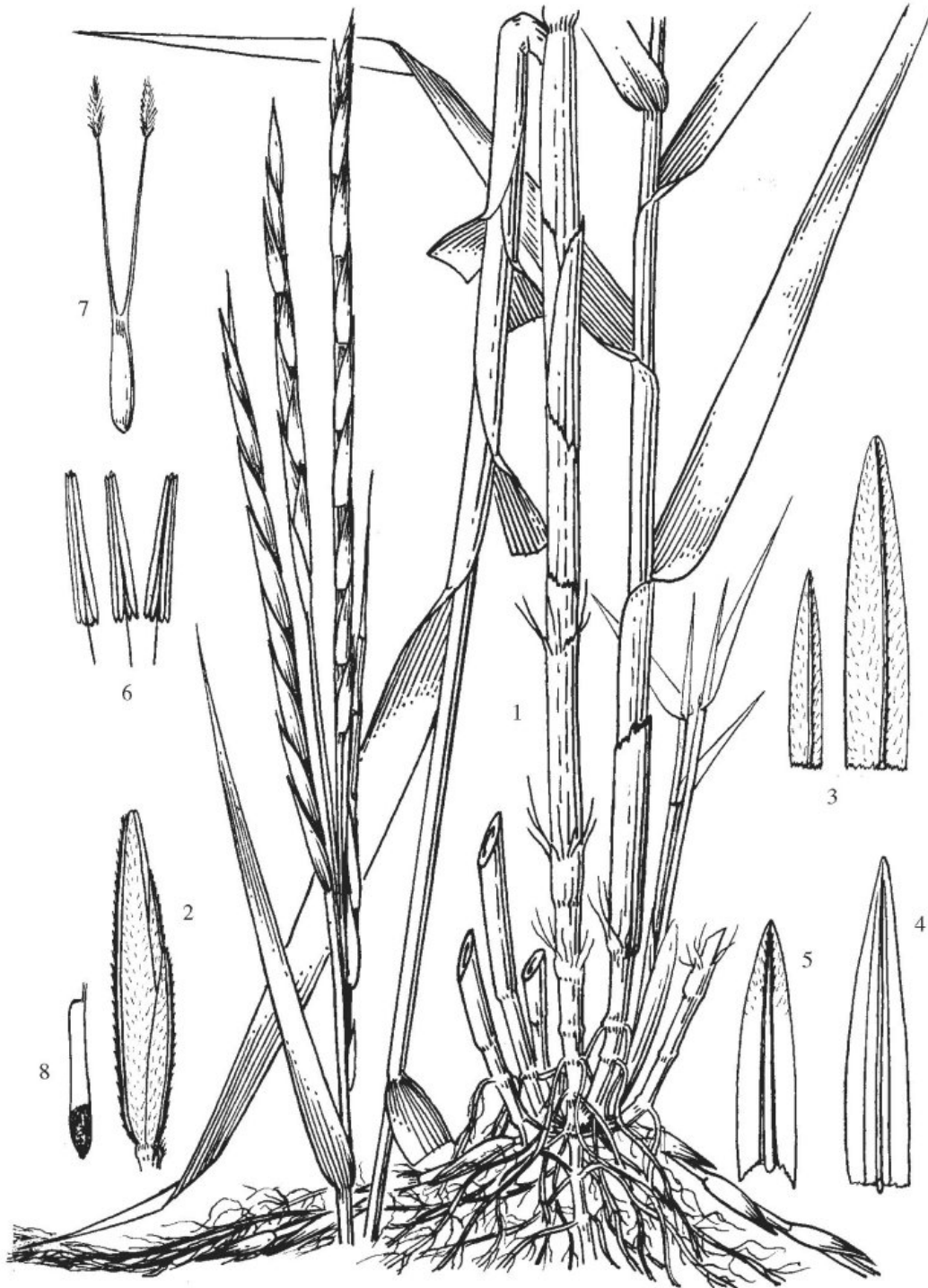


Figura 38. 1-7. *Spartina anglica* C.E. Hubbard -1. Habit. -2. Espiguilla. -3. Glumas. -4. Lemma. -5. Palea.

-6. Estambres. -7. Pistil. -8. Cariósida. Fuente: (eFloras, 1990)

Sporobolus arabicus Boiss.



Figura 39. *Sporobolus arabicus*.

Sporobolus ioclados Nees

Familia

Sporobolus

Descripción

Los mechones frecuentemente conectados por estolones leñosos; calmos de hasta 60 cm de altura. Láminas de las hojas glaucas, estrechamente linear-acuminadas, involutas, raramente planas, hasta 25 cm de largo y 2-3 mm de ancho, rígidas, picantes,

ciliadas espinulosas en los márgenes cerca de la base. Panícula elíptica o piramidal, hasta 20 cm en largo, las ramas inferiores verticiladas, desnudas en la base, hasta 6 cm en largo. Espiguillas de 1.5-2.5 mm de largo, lisas o escabriúsculas, densamente agrupadas en los extremos de las ramas; primera gluma 0.5-0.8 mm de largo, obtusa o truncada; segunda gluma 1.4-2.4 mm de largo, casi tan larga como la lemma, lanceolado-elíptica, aguda; lemma similar a la gluma superior, tan larga como la espiguilla; anteras 3, 1.2-1.5 mm de largo. Elipsoide de grano, 0,8-1,2 mm de largo (eFloras, 1970).

Origen

Pakistán, Arabia, Irán, India.

Comentarios de autores

Es una especie que crece en marismas saladas, por ende, tiene la capacidad de desarrollarse y sobrevivir en ambientes de anegación. En 2016, Gilani et al., demostró que un sistema basado en electrodos de grafito permite una producción de corriente mas estable, esto a comparación a los electrodos de níquel. Así mismo la especie de *Sporobolus arabicus* generó la máxima salida de potencia con un sistema estructurado con electrodos de grafito, a comparación de las especies *Cynodon*. Esto concluyó que *S. arabicus* tiene suficiente liberación de rizodepósitos para ayudar al transporte de electrones. Finalmente, la investigación determinó la vital importancia que juega los materiales de los electrodos, puesto que los electrodos metálicos no son eficientes (Gilani et al., 2016).



Figura 40. *Sporobolus arabicus*. A. Plant. B. Espiguilla.

A su vez el fotoperiodo también es un factor limitante, puesto que la corriente de salida incrementaba durante los periodos diurnos; y un decrecimiento en la corriente y poder de densidad durante la noche (Gilani et al., 2016).

Trigonella foenum-graecum Linnaeus

Familia

Fabaceae

Nombre común

Fenogreco

Descripción

Es una especie de planta anual de entre 20 a 50 cm de altura; cuenta con hoja compuestas de tres hojuelas oblongas. Es una planta que florece en primavera; flores blancas (eFloras, 1967).

Origen

Su origen no es claro, pero ha sido fuertemente distribuida por Pakistán, Kashmir, India, Sur de Europa, Etiopia, entre otros.

Comentarios de autores

Trigonella foenum-graecum es una planta leguminosa. Las plantas de leguminosas son conocidas por las altas densidades de bacterias en su rizosfera dadas sus actividades de fijación de nitrógeno. Lo que la hace atractiva para el estudio implementando CCM. Sophia et al., demostró que *t. foenum-graecum*, junto con *canna stuttgart*, exhibieron altas producciones de bioenergía (Sophia & Sreeja, 2017).



Figura 41. *Trigonella foenum-graecum*.

Vetiveria zizanioides Nash

Chrysopogon zizanioides

Familia

Poaceae

Nombre común

El vetiver

Descripción

El vetiver puede crecer hasta 1,5 metros, sus tallos son altos, las hojas son largas, delgadas y rígidas. A diferencia de la mayoría de las gramíneas, las raíces del vetiver crecen masivamente de manera vertical y alcanzan una profundidad de hasta 4 metros. Sus semillas no son fértiles, por lo cual es una planta ecológicamente segura (eFloras, 1978).

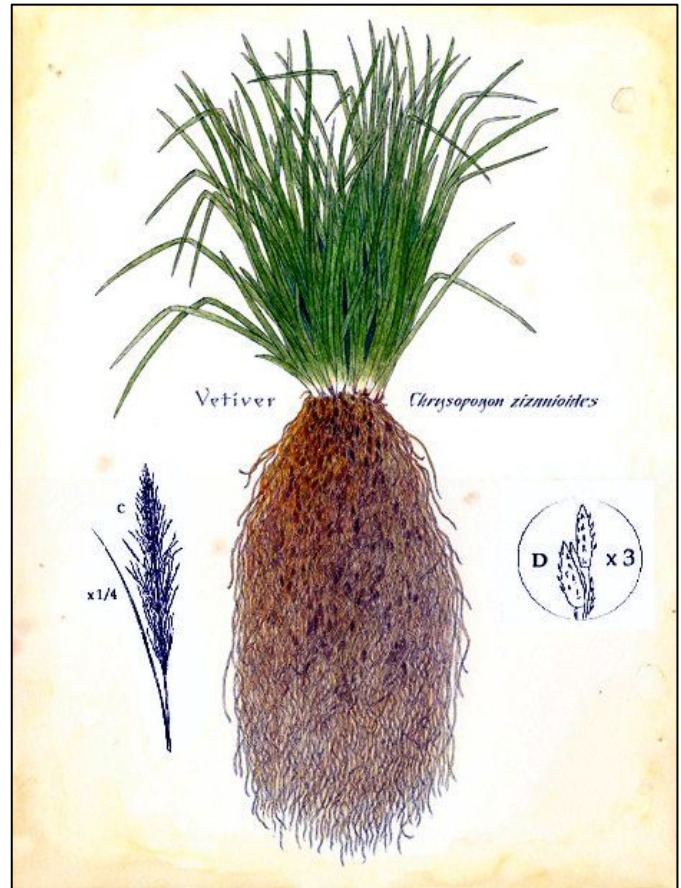


Figura 42. *Vetiveria zizanioides* Nash

Origen

África tropical, India, Bruma y el sur de Asia.

Comentarios de autores

Vetiveria zizanioides ha sido estudiada anteriormente por su producción de bioelectricidad en simultaneo con el tratamiento de aguas residuales. Esta planta es foco de interés por sus raíces densas, la adaptabilidad a las condiciones extremas, y a su vez es

resistente al estrés biótico. Por esta razón, *v. zizaniodes* representa una planta ideal para las celdas de combustible microbianas, además de sus características respecto a la fitoremediación y la remociones de contaminantes en suelo y agua (Regmi et al., 2018)

Cyperus papyrus Linnaeus

Familia

Cyperaceae

Nombre común

Papiro

Descripción

Esta especie tiene la capacidad de formar matorrales densos, los cuales pueden alcanzar de tres a cinco metros de altura, y hasta seis metros a su ápice; sus hojas son de color verde jade, largas, delgadas y firmes. Las espigas marrones, rodeadas de brácteas muy similares a las hojas. Vive sobre terrenos



Figura 43. *Cyperus papyrus*.

arenosos y con altas cantidades de húmedas, a su vez de necesitar constante radiación solar durante todo el año. El papiro se multiplica a través de sus rizomas, de los que suelen emerger troncos cada cierto periodo; aunque también produce semillas que son transportadas por el viento. Puede tolerar temperaturas de 10 a 30°C, y pH entre 6 a 8,5 (Linnaeus, Papyrus, 1753).

Origen

África, sur de Asia, Sur de Europa.

Comentarios de autores

El papiro se encuentra en ambientes anegados y constituye a uno de los macrófitos emergentes más prolífico; se cultiva en humedales para el tratamiento de aguas residuales, ya que mantiene la capacidad de acumular grandes cantidades de nutrientes en su tallo (Azri et al., 2018). Esta planta pertenece a las plantas que tienen una vida fotosintética C4 lo que representa una mejor eficiencia para la producción de energía; sin embargo en el estudio de Azri et al., junto con otras dos plantas, de vías fotosintéticas C3, generó un incremento en el voltaje aunque después la planta disminuyó su potencial al igual que su vitalidad, causado, quizá, por el período de cosecha (Azri et al., 2018)



Figura 44. Figura botánica de *Cyperus Papyrus*.

Gulamhussein y Randall, Plantearon el diseño y la operación de una celda de combustible microbiana usando *cyperus papyrus*, en donde reconocen que esta planta tiene un sistema fibroso de raíces y su mejor crecimiento se da en suelos con un pH neutro (Gulamhussein & Randall, 2020).

Ipomoea aquatica Forsskal

Familia

Convolvulaceae

Nombre común

Espinaca de agua

Origen

Nativa y cultivada en Bangladesh, Camboya, India, Indonesia, Laos, Nepal, Nueva Guinea, Pakistán, Filipinas, Tailandia, África, Vietnam, Australia, Sur América, Islas del pacífico.

Descripción

I. aquatica es una planta anual que crece en el agua o en terreno húmedo. Sus tallos pueden llegar a medir de 2 a 3 m de largo o más, echando raíces en los nodos; estas raíces son huecas, lo que les da la habilidad de flotar. Las hojas varían desde sagitadas típicas (en forma de punta de flecha) a lanceoladas, de 5 a 15 cm de largo y de 2 a 8 cm de ancho. Las flores con forma de trompeta, miden 3 a 5 cm de diámetro, por lo general de color blanco con un centro malva. Las flores pueden formar frutos con semillas que se pueden utilizar para plantar (eFloras, 1775).

Comentarios de autores



Figura 45. *Ipomoea aquatica*.

Ipomea aquatica ha sido estudiada en conjunto con la remoción de contaminantes en tratamiento de aguas residuales; sin embargo, esta planta posee un alto valor alimenticio para

los humanos, lo que indujo a Pamintuan et al., a realizar una investigación sobre la aplicación de CCM en plantas acuáticas de fácil y rápido crecimiento, y a su vez, evaluando la producción de energía eléctrica por medio de circuitos en serie y en paralelo; esto, aunque obvia las reglas de los circuitos electrónicos, al tratarse de un sistema biológico y natural, es de vital importancia conocer su comportamiento en conjunto con las especies vegetales (Pamintuan et al., 2018).



Figura 46. *Ipomea aquatica*. A. Rama. B. Flor.

Phragmites australis

Familia

Poaceae

Nombre común

Carrizo

Descripción

Es una especie perenne, con un rizoma rastrero que tiene la capacidad de crecer en la superficie en busca de agua, esta planta puede alcanzar los 4 metros de altura y 2 cm de diámetro, presentando una gran



Figura 47. *Phragmites australis*.

inflorescencia al final del tallo. Suele habitar en suelos húmedos y orillas de cursos de agua y lagunas, donde puedan enraizar (Trinitus, 1840).

Origen

Cosmopolita

Comentario de autores

Wetser et al., realizó una investigación aplicando las CCM en plantas de humedales, usando *Spartina anglica* y *phragmites australis*. Esta planta demostró que bajo condiciones de laboratorio puede sobrevivir, puesto que sus raíces se mantuvieron creciendo por el compartimiento del ánodo, demostrando así su vitalidad. Esta investigación incluso ayudó a

determinar que el mejor método para la lectura del potencial de generación de energía se puede analizar mediante la captación de emisiones de metano, puesto que los microorganismos electroquímicamente activos demuestran un comportamiento significativo en la actividad metanogénica (K. Wetser et al., 2015). Wetser et al., indicó que más energía puede ser potencialmente generada por una CCM-P que usando la misma cantidad de área cultivable para digestión anaeróbica o combustión de la biomasa (K. Wetser et al., 2015).

Así mismo en 2017, un estudio llevado a cabo por Moqsud et al., observó que las plantas marinas eran mas eficientes en la generación de bioelectricidad que las de agua dulce. Incluso *p. australis* alcanzó el mayor voltaje de la investigación (Moqsud et al., 2017).



Figura 48. *Phragmites australis*.

Referencias

- Katou. (2009). *Flora de mikawa*. Obtenido de Todasiba (トダシバ 戸田芝):
<https://mikawanoyasou.org/data/todasiba.htm>
- WFO. (2020). *World Flora Online*. Obtenido de Arundinella hirta (Thunb.) Tanaka:
<http://www.worldfloraonline.org/taxon/wfo-0000850728>.
- eFloras. (1990). *Flora of china*. Obtenido de Arundinella hirta:
http://www.efloras.org/object_page.aspx?object_id=95026&flora_id=2
- eFloras. (2002). *Flora of China*. Obtenido de Arundo donax:
http://www.efloras.org/object_page.aspx?object_id=95033&flora_id=2
- Jinfeng, W. (1987). *Flora of china*. Obtenido de Brassica juncea:
http://www.efloras.org/object_page.aspx?object_id=11770&flora_id=2
- Goldblatt, P. (2020). *Trópicos*. Obtenido de Chasmanthe Floribunda:
<http://legacy.tropicos.org/Image/40718>
- Wilson-Ramsey, Y. (Abril de 2018). *Flora of North America*. Obtenido de Chasmanthe floribunda: http://beta.floranorthamerica.org/File:FNA26_Plate_065.jpeg#metadata
- Conroy, S. (2011). Obtenido de Chlorophytum comosum.
- Chunrong, L., & Ronghou, Z. (1961). *Flora of China*. Obtenido de Cyperus involucratus:
http://www.efloras.org/object_page.aspx?object_id=122536&flora_id=2
- Barkworth, M. (2007). *Flora of China*. Obtenido de Puccinellia distans:
http://www.efloras.org/object_page.aspx?object_id=95540&flora_id=2
- Liu, B. J. (2018). Anodic potentials, electricity generation and bacterial community as affected by plant roots in sediment microbial fuel cell: Effects of anode locations. *Chemosphere*, 739-747.
- eFloras. (1999). *Flora of China*. Obtenido de Canna indica Linnaeus:
http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=200028486
- Shaorong, H., & Shuqin, C. (1981). *Flora of China*. Obtenido de Canna indica:
http://www.efloras.org/object_page.aspx?object_id=60397&flora_id=2

- eFloras. (s.f.). *Flora of China*. Obtenido de *Acorus gramineus* Solander ex Aiton:
http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=200027132
- Rong, X. (1979). *Flora of China*. Obtenido de *Acorus gramineus*:
http://www.efloras.org/object_page.aspx?object_id=122141&flora_id=2
- Bailey, L. (2005). *Manual of Gardening*. Estados Unidos.
- eFloras. (s.f.). *Flora of China*. Obtenido de *Arundo donax* Linnaeus:
http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=200024889
- SCBG Checklist. (s.f.). *South China Botanical Garden Checklist*. Obtenido de *Brassica juncea* :
http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=610&taxon_id=200009253
- eFloras. (1997). *Flora of China*. Obtenido de *Cyperus involucratus* Rottbøl:
http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=242357677
- Lemaire, C. A. (1854-1896). *Pothos aurea*. *L'illustration horticole*.
- Ping, L. (1959). *Flora of China*. Obtenido de *Lolium perenne*:
http://www.efloras.org/object_page.aspx?object_id=95386&flora_id=2
- Ping, C. &. (2002). *Flora of China*. Obtenido de *Oryza sativa*:
http://www.efloras.org/object_page.aspx?object_id=95435&flora_id=2
- eFloras. (s.f.). *Flora of China*. Obtenido de *Eichhornia crassipes*:
http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=200027394
- Bunting, G. S. (1964). *Pothos aureus* Linden & André. *Annals of the Missouri Botanical Garden*.
- eFloras. (1919). *Flora of China*. Obtenido de *Glyceria maxima*:
http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=242323581
- Linnaeus, C. v. (1753). *Lolium perenne*. *Species Plantarum*.
- Linnaeus, C. v. (1753). *Oryza sativa*. *Species Plantarum*, 333.
- eFloras. (1848). *Flora of China*. Obtenido de *puccinellia distans*:
http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=200026123

eFloras. (1978). *Flora of China*. Obtenido de *Spartina Anglica*:
http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=600&taxon_id=200026343

eFloras. (1970). *Flora of Pakistan*. Obtenido de *Sporobolus arabicus*:
http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=5&taxon_id=250071936

eFloras. (1967). *Flora of Pakistan*. Obtenido de *Trigonella foenum-graecum*:
http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=5&taxon_id=200012345

eFloras. (1978). *Gramineae in Flora of Taiwan*. Obtenido de *Vetiveria zizanioides*:
http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=1050&taxon_id=200026459

Linnaeus, C. v. (1753). *Papyrus*. *Species Plantarum*, 47.

eFloras. (1775). *Flora of China*. Obtenido de *Ipomoea aquatica*:
http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=200018842

Trinitus, C. B. (1840). *Phragmites australis*. *Nomenclator botanicus*, 143.

eFloras. (1753). *Flora of North America*. Obtenido de *Sedum album*:
http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=1&taxon_id=250092127

eFloras. (1753). *Flora of North America*. Obtenido de *Sedum sexangulare*:
http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=1&taxon_id=250092130

eFloras. (1753). *Flora of North America*. Obtenido de *Sedum reflexum*:
http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=1&taxon_id=250092131

Bibliografía

Arends, J. B. A., Blondeel, E., Tennison, S. R., Boon, N., & Verstraete, W. (2012). Suitability of granular carbon as an anode material for sediment microbial fuel cells. *Journal of Soils and Sediments*, 12(7), 1197–1206. <https://doi.org/10.1007/s11368-012-0537-6>

Arends, J. B. A., Speeckaert, J., Blondeel, E., De Vrieze, J., Boeckx, P., Verstraete, W., ... Boon, N. (2014). Greenhouse gas emissions from rice microcosms amended with a plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(7), 3205–3217. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5328-5>

- Azri, Y. M., Tou, I., Sadi, M., & Benhabyles, L. (2018). Bioelectricity generation from three ornamental plants: *Chlorophytum comosum*, *Chasmanthe floribunda* and *Papyrus diffusus*. *International Journal of Green Energy*, 15(4), 254–263. <https://doi.org/10.1080/15435075.2018.1432487>
- Bagshaw Ward, N. (1899). *Library of The New York Botanical Garden* (Second). London.
- Brinker, A. (2012). Morphogenesis of the Terrarium. *The American Biology Teacher*, 74(7), 521–524. <https://doi.org/10.1525/abt.2012.74.7.17>
- Cabezas, A. (2010). Diversity and Function of the Microbial Community on Anodes of Sediment Microbial Fuel Cells fueled by Root Exudates Doctoral. *Microbiology, PhD*, 184.
- Cabezas, A., Pommerenke, B., Boon, N., & Friedrich, M. W. (2015). Geobacter, Anaeromyxobacter and Anaerolineae populations are enriched on anodes of root exudate-driven microbial fuel cells in rice field soil. *Environmental Microbiology Reports*, 7(3), 489–497. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12277>
- Chicas, S. D., Sivasankar, V., Omine, K., Valladarez, J., & Mylsamy, P. (2018). Plant microbial fuel cell technology: Developments and limitations. En *Microbial Fuel Cell Technology for Bioelectricity* (pp. 49–65). https://doi.org/10.1007/978-3-319-92904-0_3
- China, F. of. (2000). CANNA Linnaeus. *Smithsonian*, 510650–510650.
- Clark, M. A., Choi, J., & Douglas, M. (2018). *Biology 2e*. Houston, Texas.
- Damen, T. H. J., van der Burg, W. J., Wiland-Szymańska, J., & Sosef, M. S. M. (2018). Taxonomic novelties in African *Dracaena* (Dracaenaceae). *Blumea: Journal of Plant Taxonomy and Plant Geography*, 63(1), 31–53. <https://doi.org/10.3767/blumea.2018.63.01.05>

- Daniels, F. (1972). Photochemical Effects of Sunlight. *Biophysical Journal*, 12(7), 723–727.
[https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(72\)86116-2](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(72)86116-2)
- French, C. S. (1952). Photosynthesis and related processes. *Physics Today*, 5(3), 20–21.
<https://doi.org/10.1063/1.3067511>
- Gilani, S. R., Yaseen, A., Zaidi, S. R. A., Zahra, M., & Mahmood, Z. (2016). Photocurrent generation through plant microbial fuel cell by varying electrode materials. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 38(1), 17–27.
- Gómora-Hernández, J. C., Serment-Guerrero, J. H., Carreño-De-león, M. C., & Flores-Alamo, N. (2020). Voltage production in a plant-microbial fuel cell using *Agapanthus africanus* | Producción de voltaje en una celda de combustible microbiana vegetal utilizando *Agapanthus africanus*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(1), 227–237. <https://doi.org/10.24275/rmiq/IA542>
- Gul, M. M., & Ahmad, K. S. (2019). *Biosensors and Bioelectronics Bioelectrochemical systems : Sustainable bio-energy powerhouses*. (August).
- Gulamhussein, M., & Randall, D. G. (2020). Design and operation of plant microbial fuel cells using municipal sludge. *Journal of Water Process Engineering*, 38.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101653>
- Habibul, N., Hu, Y., Wang, Y. K., Chen, W., Yu, H. Q., & Sheng, G. P. (2016). Bioelectrochemical Chromium(VI) Removal in Plant-Microbial Fuel Cells. *Environmental Science and Technology*, 50(7), 3882–3889.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06376>
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuhn, A. J., Blok, C., & Buisman, C. J. N. (2010). Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*. *Bioresource*

Technology, 101(10), 3541–3547. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.124>

Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuijken, R. C. P., & Buisman, C. J. N. (2012). New plant-growth medium for increased power output of the Plant-Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, 104, 417–423. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.005>

Helder, Marjolein. (2012). *Design criteria for the Plant-Microbial Fuel Cell Electricity generation with living plants – from lab to application*. Recuperado de <https://www.plant-e.com/en/informatie/>

Helder, Marjolein, Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Raes, S. M. T., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2013). Resilience of roof-top Plant-Microbial Fuel Cells during Dutch winter. *Biomass and Bioenergy*, 51(0), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.011>

Hublikar, L., Ganachari, S. V., & Yaradoddi, J. S. (2019). Green Energy Generation from Microbial Fuel Cells. En L. M. T. Martínez, O. V. Kharissova, & B. I. Kharisov (Eds.), *Handbook of Ecomaterials* (Vol. 1, pp. 1207–1220). https://doi.org/10.1007/978-3-319-68255-6_195

Jung, S. P., & Pandit, S. (2018). Important factors influencing microbial fuel cell performance. En *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Microbial Electrochemical Technology: Sustainable Platform for Fuels, Chemicals and Remediation*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00015-7>

Kabutey, F. T., Zhao, Q., Wei, L., Ding, J., Antwi, P., Quashie, F. K., & Wang, W. (2019). An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110(September 2018), 402–414. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.016>

- Kaku, N., Yonezawa, N., Kodama, Y., & Watanabe, K. (2008). Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(1), 43–49. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1410-9>
- Klaisongkram, N., & Holasut, K. (2015). *Electricity generation of Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) using Cyperus Involucratus R.* 42(1), 117–124. <https://doi.org/10.14456/kkuenj.2015.2>
- Kothapalli, A. (2013). Sediment Microbial Fuel Cell as Sustainable Power Resource. *UM Digital Commons*, (December), 1–50.
- Kumar, S. S., Kumar, V., Kumar, R., Malyan, S. K., & Pugazhendhi, A. (2019). Microbial fuel cells as a sustainable platform technology for bioenergy, biosensing, environmental monitoring, and other low power device applications. *Fuel*, 255(February), 115682. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115682>
- Kwak, J. Il, & An, Y. J. (2016). The current state of the art in research on engineered nanomaterials and terrestrial environments: Different-scale approaches. *Environmental Research*, 151, 368–382. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.08.005>
- Liu, B., Ji, M., & Zhai, H. (2018). Anodic potentials, electricity generation and bacterial community as affected by plant roots in sediment microbial fuel cell: Effects of anode locations. *Chemosphere*, 209, 739–747. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.122>
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., ... Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environmental Science and Technology*, 40(17), 5181–5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
- Long, S. P. (1999). Environmental Responses. *C4 Plant Biology*, 215–249. <https://doi.org/10.1016/b978-012614440-6/50008-2>

- Lu, L., Xing, D., & Ren, Z. J. (2015). Microbial community structure accompanied with electricity production in a constructed wetland plant microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, *195*, 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.098>
- Md Khudzari, J., Kurian, J., Gariépy, Y., Tartakovsky, B., & Raghavan, G. S. V. (2018). Effects of salinity, growing media, and photoperiod on bioelectricity production in plant microbial fuel cells with weeping alkaligrass. *Biomass and Bioenergy*, *109*(December 2017), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.12.013>
- Moqsud, M. A., Gazali, T. A., Omine, K., & Nakata, Y. (2017). Green electricity by water plants in organic soil and marine sediment through microbial fuel cell. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, *39*(2), 160–165. <https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1159263>
- Nitorisavut, R., & Regmi, R. (2017). Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*(March), 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.064>
- Nurture Nature Center. *Terrarium Habitats*.
- Pamintuan, K. R. S., Calma, M. A. L., Feliciano, K. A. D., & Lariba, K. J. P. D. (2020). Potential of Bioelectricity Generation in Plant-Microbial Fuel Cells Growing House Plants. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *505*(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/505/1/012043>
- Pamintuan, K. R. S., Clomera, J. A. A., Garcia, K. V., Ravara, G. R., & Salamat, E. J. G. (2018). Stacking of aquatic plant-microbial fuel cells growing water spinach (*Ipomoea aquatica*) and water lettuce (*Pistia stratiotes*). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *191*(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/191/1/012054>
- Regmi, R., Nitorisavut, R., Charoenroongtavee, S., Yimkhaophon, W., & Phanthurat, O.

- (2018). Earthen Pot-Plant Microbial Fuel Cell Powered by Vetiver for Bioelectricity Production and Wastewater Treatment. *江苏高教*, 2(April 2017), 6–11.
- Salinas, L. F. C., Ochoa, G. V., & Cardenas, Y. E. (2018). A scientometric analysis of the investigation of biomass gasification environmental impacts from 2001 to 2017. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 8(5), 223–229.
- Sarma, P. J., & Mohanty, K. (2018). *Epipremnum aureum* and *Dracaena braunii* as indoor plants for enhanced bio-electricity generation in a plant microbial fuel cell with electrochemically modified carbon fiber brush anode. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 126(3), 404–410. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2018.03.009>
- Sarma, P. J., & Mohanty, K. (2019). An Insight into Plant Microbial Fuel Cells. *Bioelectrochemical Interface Engineering*, 137–148. <https://doi.org/10.1002/9781119611103.ch8>
- Sivasankar, V., Mylsamy, P., & Omine, K. (2018). Microbial fuel cell technology for bioelectricity. *Microbial Fuel Cell Technology for Bioelectricity*, 1–311. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92904-0>
- Sophia, A. C., & Sreeja, S. (2017). Green energy generation from plant microbial fuel cells (PMFC) using compost and a novel clay separator. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 21, 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.05.001>
- Strik, D. P. B. T. B., Hamelers (Bert), H. V. M., Snel, J. F. H., & Buisman, C. J. N. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 32(9), 870–876. <https://doi.org/10.1002/er.1397>
- Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Helder, M., Steinbusch, K. J. J., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2011). Microbial solar cells: applying photosynthetic and

- electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*, 29(1), 41–49.
<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2010.10.001>
- Takanezawa, K., Nishio, K., Kato, S., Hashimoto, K., & Watanabe, K. (2010). Factors affecting electric output from rice-paddy microbial fuel cells. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 74(6), 1271–1273. <https://doi.org/10.1271/bbb.90852>
- Tamura, M. N., Smith, W. W., Hooker, J. D., & Smith, W. W. (2000). 38. *CHLOROPHYTUM* Ker Gawler, *Bot. Mag.* 27: t. 1071. 1807. 3–5.
- Tapia, N. F., Rojas, C., Bonilla, C. A., & Vargas, I. T. (2017). Evaluation of Sedum as driver for plant microbial fuel cells in a semi-arid green roof ecosystem. *Ecological Engineering*, 108(November 2016), 203–210.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.017>
- Timmers, R. A., Strik, D. P. B. T. B., Arampatzoglou, C., Buisman, C. J. N., & Hamelers, H. V. M. (2012). Rhizosphere anode model explains high oxygen levels during operation of a *Glyceria maxima* PMFC. *Bioresource Technology*, 108, 60–67.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.088>
- Timmers, Ruud A., Rothballer, M., Strik, D. P. B. T. B., Engel, M., Schulz, S., Schloter, M., ... Buisman, C. (2012). Microbial community structure elucidates performance of *glyceria maxima* plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 94(2), 537–548. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-3894-6>
- Timmers, Ruud A., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2010). Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 86(3), 973–981. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2440-7>
- Timmers, Ruud A., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2013).

- Electricity generation by a novel design tubular plant microbial fuel cell. *Biomass and Bioenergy*, 51, 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.002>
- Tou, I., Azri, Y. M., Sadi, M., Lounici, H., & Kebbouche-Gana, S. (2019). Chlorophytum microbial fuel cell characterization. *International Journal of Green Energy*, 16(12), 947–959. <https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1650049>
- Venkata Mohan, S., Mohanakrishna, G., & Chiranjeevi, P. (2011). Sustainable power generation from floating macrophytes based ecological microenvironment through embedded fuel cells along with simultaneous wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 102(14), 7036–7042. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.033>
- Wang, H., & Ren, Z. J. (2013). A comprehensive review of microbial electrochemical systems as a platform technology. *Biotechnology Advances*, 31(8), 1796–1807. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.10.001>
- Wang, Y., Wang, J., Song, X., Abayneh, B., Ding, Y., Yan, D., & Bai, J. (2016). Microbial community structure of different electrode materials in constructed wetland incorporating microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 221, 697–702. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.116>
- Wetser, K., Dieleman, K., Buisman, C., & Strik, D. (2017). Electricity from wetlands: Tubular plant microbial fuels with silicone gas-diffusion biocathodes. *Applied Energy*, 185, 642–649. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.122>
- Wetser, K., Liu, J., Buisman, C., & Strik, D. (2015). Plant microbial fuel cell applied in wetlands: Spatial, temporal and potential electricity generation of *Spartina anglica* salt marshes and *Phragmites australis* peat soils. *Biomass and Bioenergy*, 83, 543–550. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.006>
- Wetser, Koen. (2016). *Electricity from wetlands Technology - Technology assessment of the*

tubular Plant Microbial Fuel Cell with an integrated biocathode.

- Wetser, Koen, Sudirjo, E., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2015). Electricity generation by a plant microbial fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode. *Applied Energy*, *137*, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.006>
- Widharyanti, I. D., Hendrawan, M. A., & Christwardana, M. (2020). Membraneless Plant Microbial Fuel Cell using Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for Green Energy Generation and Biomass Production. *International Journal of Renewable Energy Development*, *10*(1), 71–78. <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.32403>
- Yasri, N., Roberts, E. P. L., & Gunasekaran, S. (2019). The electrochemical perspective of bioelectrocatalytic activities in microbial electrolysis and microbial fuel cells. *Energy Reports*, *5*, 1116–1136. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.007>
- Yoon, T. H., Song, H. J., Jung, W. Y., Kim, J. E., Kim, K. J., Kim, H. H., ... Kim, H. J. (2018). Monitoring Plant Health Using a Plant Microbial Fuel Cell. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, *39*(10), 1193–1197. <https://doi.org/10.1002/bkcs.11575>
- Zhao, Y., Collum, S., Phelan, M., Goodbody, T., Doherty, L., & Hu, Y. (2013). Preliminary investigation of constructed wetland incorporating microbial fuel cell: Batch and continuous flow trials. *Chemical Engineering Journal*, *229*, 364–370. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.023>