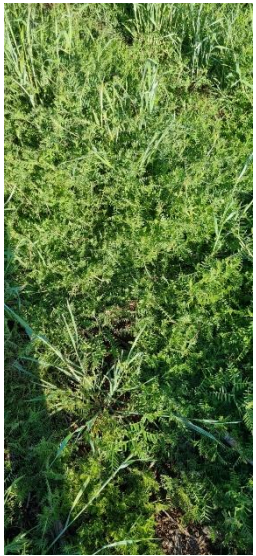




PROYECTO BIOENERGÍA



Evaluación de cultivos bioenergéticos y uso agronómico de digestatos

ENSAYOS Y MEDICIONES CAMPAÑA 2022/23



Contenido

Introducción.....	4
Resumen de ensayos 2022-23	5
Resultados.....	5
1. San Marcos, General Villegas:.....	5
1.1 Pastura perenne.....	5
1.2 Cultivos invernales anuales.....	7
1.3 Genética de sorgo para silaje.....	7
1.4 Genética de maíces para silaje.....	11
1.5 Tasa de secado del maíz.....	13
1.6 Nuevos cultivos bioenergéticos: Maíz de Guinea, Kenaf, Caña de Castilla.....	14
Resumen por cultivo- San Marcos	15
2. Ea. Huelucán (Buena Esperanza, San Luis).....	17
2.1 Sorgo	17
2.2 Genética de maíz para silaje	18
2.3 Nuevos cultivos bioenergéticos: Maíz de Guinea, Kenaf, Caña de Castilla.....	20
2.4 Uso agronómico de digestato	21
Resumen por cultivo – Huelucán	23
3. Ea. El Triunvirato. (Monte Maíz)	25
3.1 Cultivos invernales anuales.....	25
3.2 Genética de sorgo para silaje.....	26
3.3 Uso agronómico de digestato.....	26
Resumen por cultivo – El Triunvirato.....	30
Nitrógeno x Densidad en maíz para silaje.....	30
¿De qué depende la producción de biogás?.....	34
Resumen	37
Conclusiones generales del proyecto	37

Introducción

Durante el ciclo agrícola 2022-2023, se llevaron a cabo diversos ensayos relacionados con la producción de biomasa para bioenergía en tres establecimientos ubicados en distintas provincias de Argentina. Estos ensayos incluyeron el cultivo de especies invernales, pasturas, el uso agronómico del digestato como fertilizante y el cultivo de especies estivales.

Los sitios donde se realizaron los ensayos fueron los siguientes:

- Buena Esperanza (San Luis): Establecimiento "Huelucán" de la firma Tigonbu S.A.
- General Villegas (Buenos Aires): Establecimiento "San Marcos" de la empresa María Elena S.A.
- Monte Maíz (Córdoba): Establecimiento "El Triunvirato" de la empresa ENRECO S.A.

La Figura adjunta muestra la ubicación geográfica de los tres sitios donde se llevaron a cabo los ensayos mencionados.

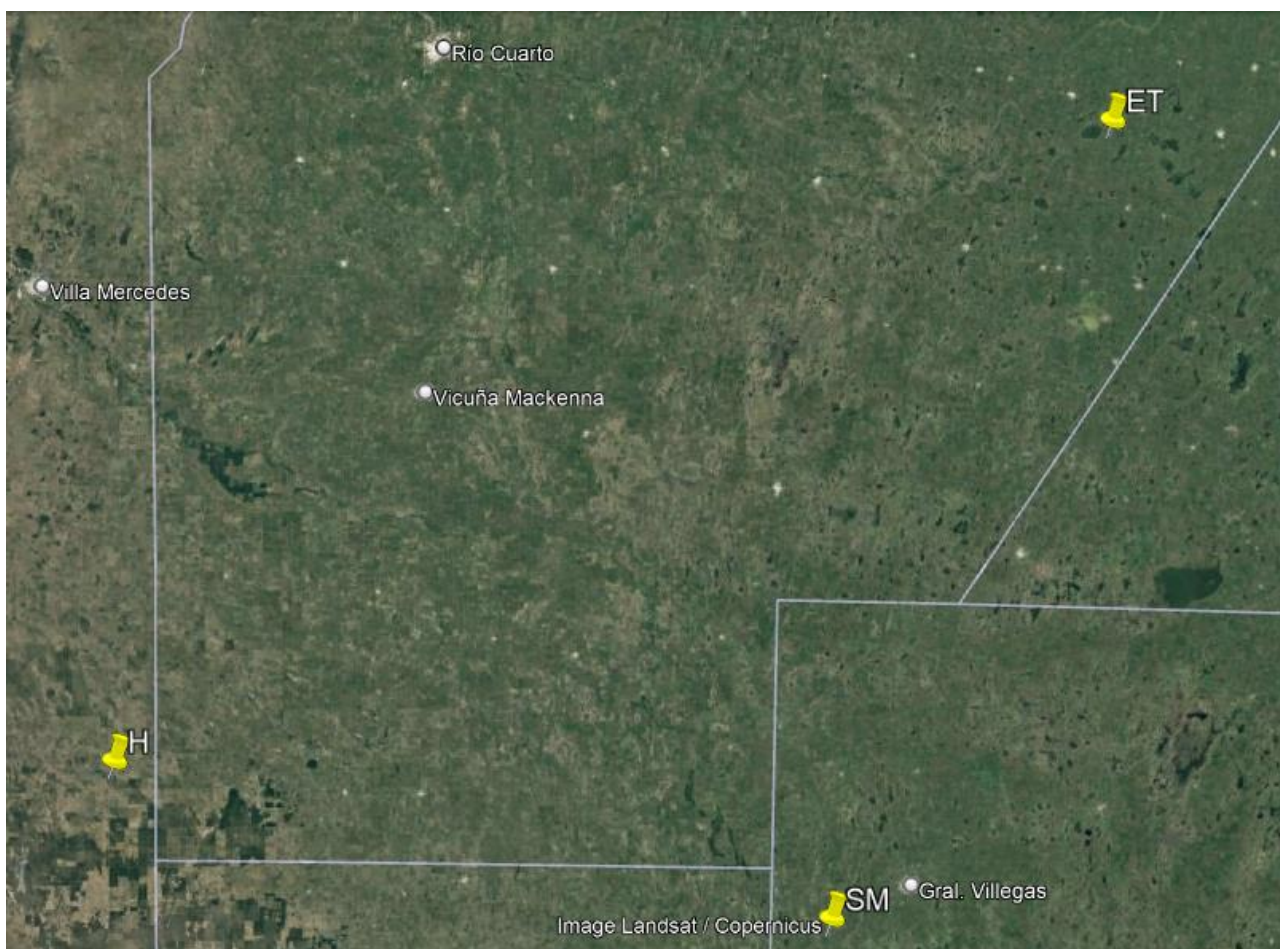


Figura 1: Ubicación de sitios de ensayos campaña 2022-23. H: Huelucan, SM: San Marcos, ET: El Triunvirato.

Resumen de ensayos 2022-23

Tabla 1. Ensayos realizados en los establecimientos Huelucán, San Marcos y El Triunvirato, campaña 2022-23.

Campaña 2022-23		Establecimiento y Localidad		
		Huelucán	San Marcos	El Triunvirato
		Buena Esperanza (San Luis)	General Villegas (Buenos Aires)	Monte Maíz (Córdoba)
Ensayo	Cultivos de invierno	no	cereales puros	puros y consociados
	Pastura perenne	no	sí	no
	Maíz de Guinea	sí	sí	no
	Kenaf	sí	sí	no
	Caña de Castilla	sí	sí	no
	Genética de maíz para silaje	sí	sí	no
	Genética de sorgo para silaje	sí	sí	sí
	NsÍD Maíz para silaje	no	sí	sí
	Digestato	sí	no	sí

Resultados.

1. San Marcos, General Villegas:

1.1 Pastura perenne

Las mediciones de materia seca y estimaciones de producción se realizaron en una pastura consociada de dos años de edad, compuesta por alfalfa, festuca, cebadilla y trébol blanco, correspondiente a un lote de producción.

Se identificaron dos ambientes dentro del lote: loma y bajo. La loma representa el ambiente de mayor potencial productivo, mientras que el bajo es el de menor potencial, especialmente en años de precipitaciones abundantes debido a los anegamientos que se producen.

Los cortes de la pastura se realizaron entre octubre de 2022 y septiembre de 2023. Las producciones de biomasa y el potencial de biogás obtenido en cada corte se pueden observar en la Tabla 2. Asimismo, la curva de acumulación de la producción se muestra en la Figura 1.

Tabla 2. Contenido de materia seca (MS, %), Producción de biomasa (kg MS/ha), Potencial de Biogás (m3/ tMV) y Producción de biogás (m3/ha) para una pastura consociada de alfalfa + festuca + cebadilla + trébol blanco y en dos ambientes identificados como Loma y Bajo, en el Ea. San Marcos, Gral. Villegas.

Fecha	Ambiente	MS (%)	Producción biomasa (kgMS/ha)	Potencial de Biogás (m3/tMV)	Producción de Biogás (m3/ha)
01/10/2022	BAJO	25,1	3.861	143	2.193
01/11/2022	BAJO	24,4	3.054	137	1.716
01/12/2022	BAJO	23,2	3.691	121	1.921
01/01/2023	BAJO	25,4	2.728	145	1.562
01/02/2023	BAJO	32,3	2.367	187	1.369
01/03/2023	BAJO	35,9	3.112	196	1.698
01/05/2023	BAJO	14,9	887	49	292
Total	BAJO		19.700		10.753
01/10/2022	LOMA	25,8	4.360	146	2.467
01/11/2022	LOMA	24,1	4.607	134	2.560
01/12/2022	LOMA	23,6	3.883	133	2.198
01/01/2023	LOMA	27,9	4.487	166	2.669
01/02/2023	LOMA	27,8	2.996	164	1.764
01/03/2023	LOMA	23,7	1.963	131	1.084
01/05/2023	LOMA	22,9	1.406	118	723
Total	LOMA		23.700		13.466

Desde octubre a mayo, la producción de materia seca acumulada alcanzó los 23.700 kg/ha en el ambiente de loma, mientras que en el ambiente de bajo fue de 19.700 kg/ha. En cuanto al potencial de producción de biogás, en la loma se obtuvo un valor de 13.466 m³/ha, superior al registrado en el ambiente de bajo, donde se alcanzaron 10.753 m³/ha (Figura 2). Estas diferencias reflejan el mayor potencial productivo del ambiente de loma en comparación con el de bajo.

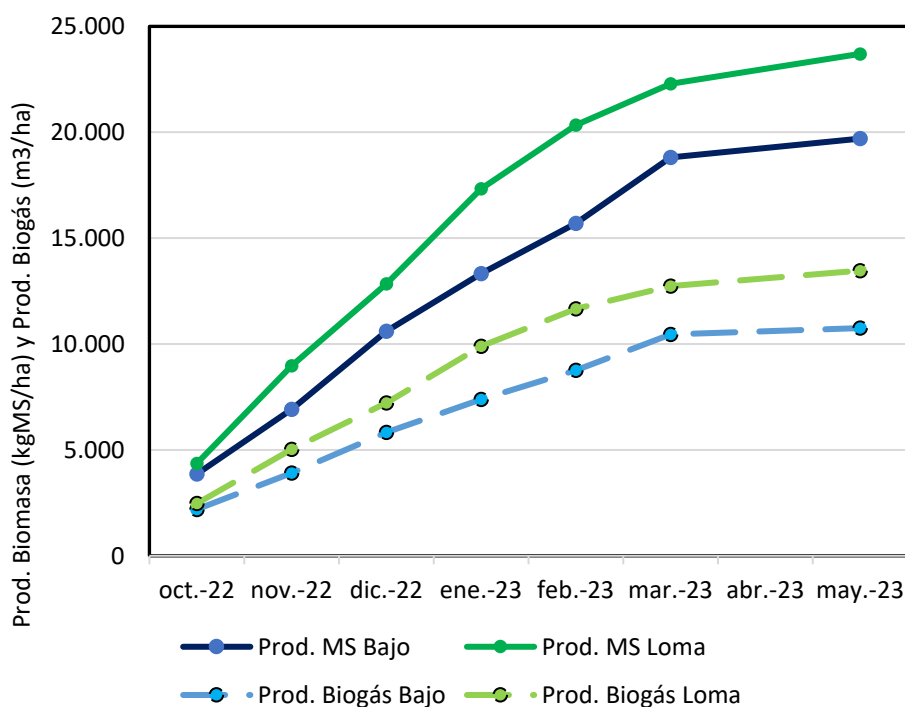


Figura 2. Producción acumulada de biomasa (kg MS/ha; líneas llenas) y Producción de biogás (m3/ha; líneas cortadas) para una pastura consociada de alfalfa + festuca + cebadilla + trébol blanco y en dos ambientes identificados como Loma (líneas verdes) y Bajo (líneas azules), en Ea. San Marcos, Gral. Villegas.

1.2 Cultivos invernales anuales.

Tabla 3. Ficha técnica del ensayo 22-23 de cereales de invierno en el Ea. San Marcos, Gral. Villegas.

Cultivo	Siembra				Fertilización		Fungicid a	Muestreo	
Especies	Lote	Fecha de siembra	DEL (cm)	Densidad (kg/ha)	Dosis MAP (kg/ha)	Dosis UREA (kg/ha)	Fecha	Fecha de corte	Estado del cultivo
Trigo	Ensayo de variedades	02/06	19	140	100	337	25/10	18/11	Grano pastoso
Cebada	57	08/07	19	180	77	185	29/10	18/11	Grano pastoso

Durante el ciclo del cultivo, se produjo una helada el 20 de febrero de 2023 que afectó el desarrollo de los cereales. Además, el cultivo de sorgo sufrió un ataque severo de pulgón, el cual fue controlado posteriormente.

El muestreo para determinar la producción de biomasa se realizó el 28 de abril de 2023, cuando los cultivos se encontraban en estado de grano pastoso.

En promedio, se obtuvo una producción de 5.782 kg/ha de materia seca y un potencial de biogás de 8.322 m³/ha. En la Tabla 4 se detallan los valores de producción discriminados por cultivo.

Tabla 4. Contenido de materia seca (MS, %), Producción de biomasa (kg MS/ha), Potencial de Biogás (m³/ tMV) y Producción de biogás (m³/ha) para 3 materiales de trigo y 1 material de cebada en el Ea. San Marcos, Gral. Villegas.

Material	MS (%)	Producción Biomasa (MS/ha)	Potencial de Biogás (m ³ /t MV)	Producción de Biogás (m ³ /ha)
Tg Baguette 750	45,07	18.677	271	11.235
Tg Quiriko	43,07	13.909	255	8.245
Tg Catalpa	45,59	13.179	266	7.695
Ceb Overture	34,01	9.949	209	6.115
Promedio			250	8.322

1.3 Genética de sorgo para silaje

En las Tablas 5 y 6 se presentan los detalles técnicos del ensayo de genética de sorgo para silaje realizado en el establecimiento San Marcos. Se evaluaron cuatro genotipos de sorgo: un híbrido de doble propósito de alto contenido en azúcares (AD 91 SUCROL), dos híbridos fotosensitivos, uno azucarado (130 GENTOS) y otro BMR (135 GENTOS), y un híbrido granífero BMR (95 GENTOS). Las densidades de siembra variaron entre 157.000 y 185.000 semillas/ha según el genotipo.

Tabla 5. Ficha técnica siembra del ensayo de sorgo.

Siembra			Fertilización	
Lote	Fecha de siembra	DEL (cm)	Fertilizante	Dosis (kg/ha)
dic-13	25/11/2022	70	MAP	90

Tabla 6. Genética y densidades utilizadas en el ensayo de sorgo.

Genética		Siembra
Tipo	Nombre	Densidad (mil sem/ha)
Doble propósito de alto grados Brix	AD 91 SUCROL	157
Fotosensitivo azucarado	130 GENTOS	157
Fotosensitivo BMR	135 GENTOS	157
Granífero BMR	95 GENTOS	185

Los rendimientos de biomasa y potenciales de biogás estuvieron comprendidos entre 6.675 y 14.500 kg MS/ha. En el ambiente de loma, la producción promedio fue 12.000 kg MS/ha y 7.200 m³/ha de biogás, un 14% y 15% superior respecto al bajo, donde se obtuvieron 10.500 kg MS/ha y 6.200 m³/ha.

En ambos ambientes, el híbrido AD 91 SUCROL logró los mayores rendimientos, con una producción 17% mayor de biomasa en loma (14.500 kg MS/ha) y 22% mayor en bajo (12.800 kg MS/ha), en comparación con los promedios respectivos.

Las Figuras 3, 4 y 5 muestran los rendimientos detallados de biomasa, materia seca, biogás y potenciales por híbrido y ambiente. Se observan incrementos de hasta un 117% en la producción de biomasa y 134% en el potencial de biogás entre los híbridos evaluados.

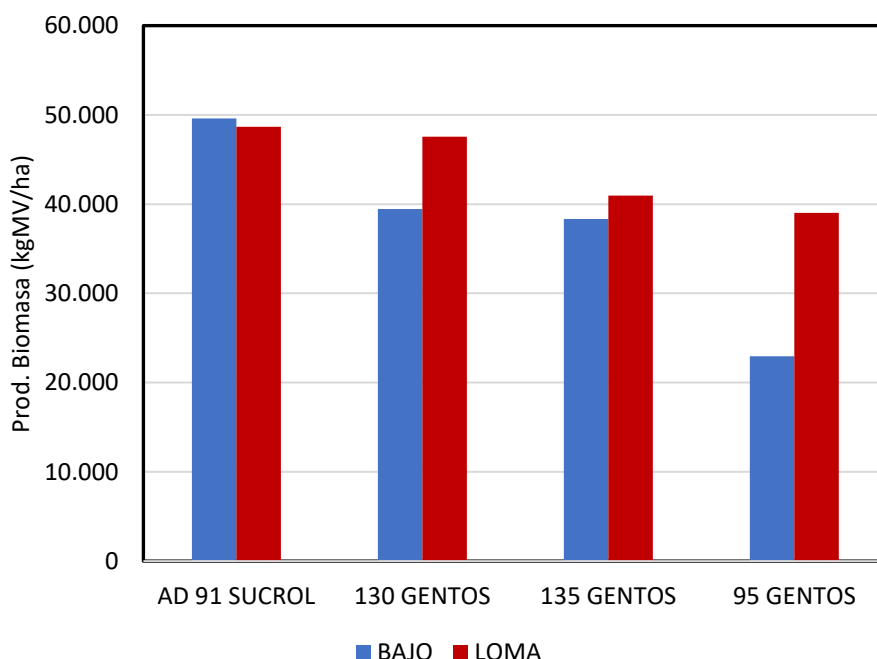


Figura 3. Producción de biomasa verde (kg MV/ha) por ambiente e híbrido de sorgo en Ea. San Marcos, Gral. Villegas.

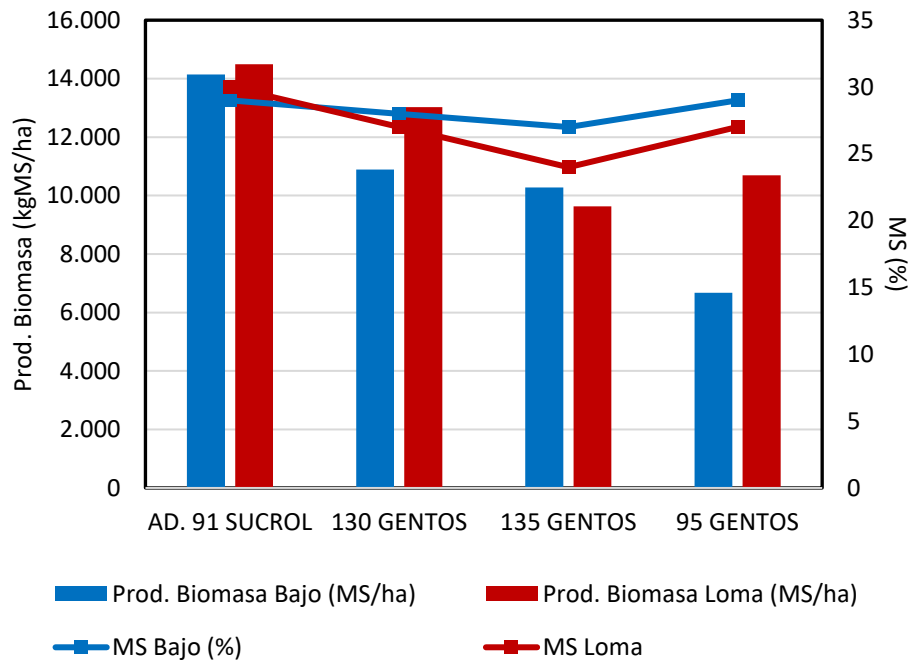


Figura 4. Producción de biomasa seca (kg MS/ha) y contenido de materia seca (%) por ambiente e híbrido de sorgo en Ea. San Marcos, Gral. Villegas.

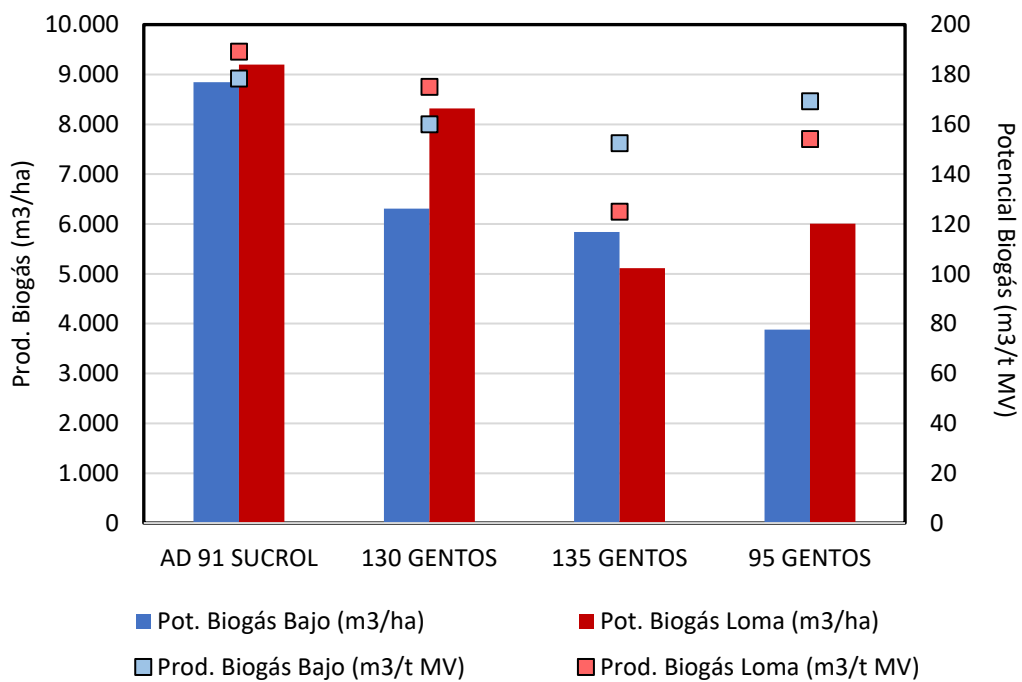


Figura 5. Potencial de biogás (m3/t MV) y producción de biogás (m3/ha) por ambiente e híbrido de sorgo en Ea. San Marcos, Gral. Villegas.

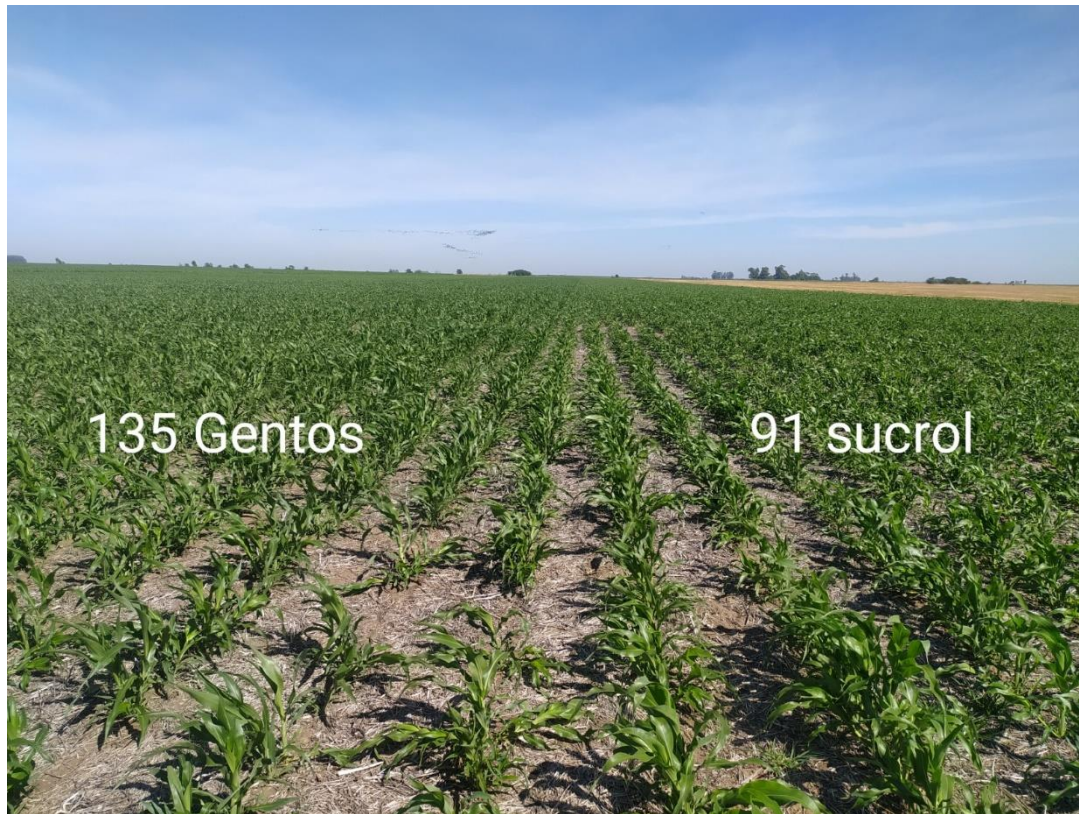


Figura 6. Estado inicial del cultivo de sorgo: Gentos 135 y 91 Sucrol.

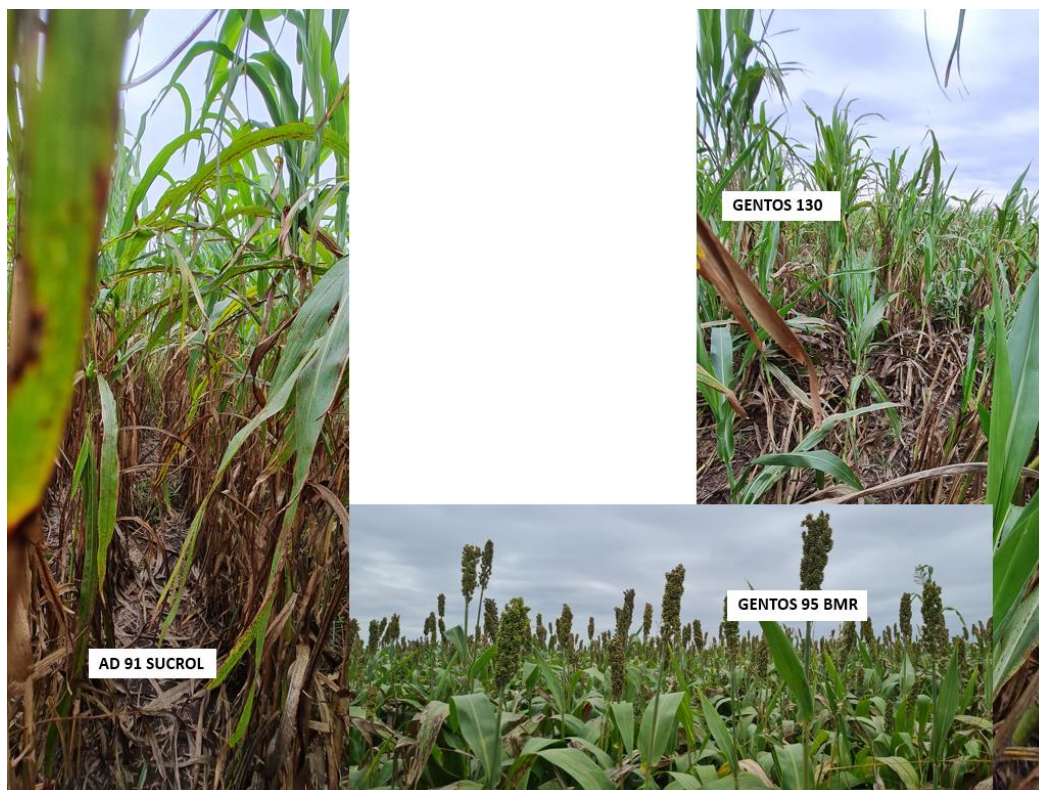


Figura 7. Ensayo de sorgo. Estado de los diferentes híbridos posterior al ataque de pulgón.

1.4 Genética de Maíces para silaje

En las Tablas 7 y 8 se detallan las condiciones de siembra y los materiales evaluados en el ensayo de genética de maíz para silaje en el establecimiento San Marcos de General Villegas. Se evaluaron tres híbridos comerciales (DK 72-72, DK 77-02 y LT 721 pro4) en un ensayo, y un híbrido KWS 60050 en dos lotes de producción (60 y 74). Las estimaciones de rendimiento se realizaron mediante muestreos a mano en el ensayo el 31/03/23, y con máquina cosechadora al momento del picado en los lotes de producción.

Tabla 7. Ficha técnica de siembra del ensayo para maíces para silo en el Ea. San Marcos, Gral. Villegas.

Siembra				Fertilización		
Lote	Fecha de siembra	DEL (cm)	Densidad (sem/ha)	P suelo (ppm)	Fertilizante	Dosis (kg/ha)
64	28/11/2022	70	65.000	28,6	MAP	60

Tabla 8. Genética de maíz utilizados, semilleros y sitios de muestreo.

Genética		
	Semillero	Material
Ensayo lote 64	DEKALB	DK 72-72
	DEKALB	DK 77-02
	LA TIJERETA	LA TIJERETA 721 pro4.
Lotes de producción	KWS	KWS 60050. Lote 60
	KWS	KWS 60050. Lote 74

En el ensayo, los rendimientos de biomasa oscilaron entre 15.900 y 17.500 kg MS/ha. El híbrido KWS 60050 rindió 17.000 kg MS/ha en el lote 74, un 7,6% más que en el lote 60 donde alcanzó 12.000 kg MS/ha.

Los potenciales de biogás se ubicaron en un rango de 192 a 286 m³/t MV para todos los materiales evaluados. La producción de biogás osciló entre 7.436 y 11.120 m³/ha, siendo el híbrido DK 77-02 el que logró el mayor valor con un 49,5% más que el KWS 60050 en el lote 60, el de menor producción.

En las Figuras 8 y 9, y la Tabla 9, se pueden observar en detalle los rendimientos de biomasa, contenidos de materia seca, potenciales y producciones de biogás para cada híbrido evaluado.

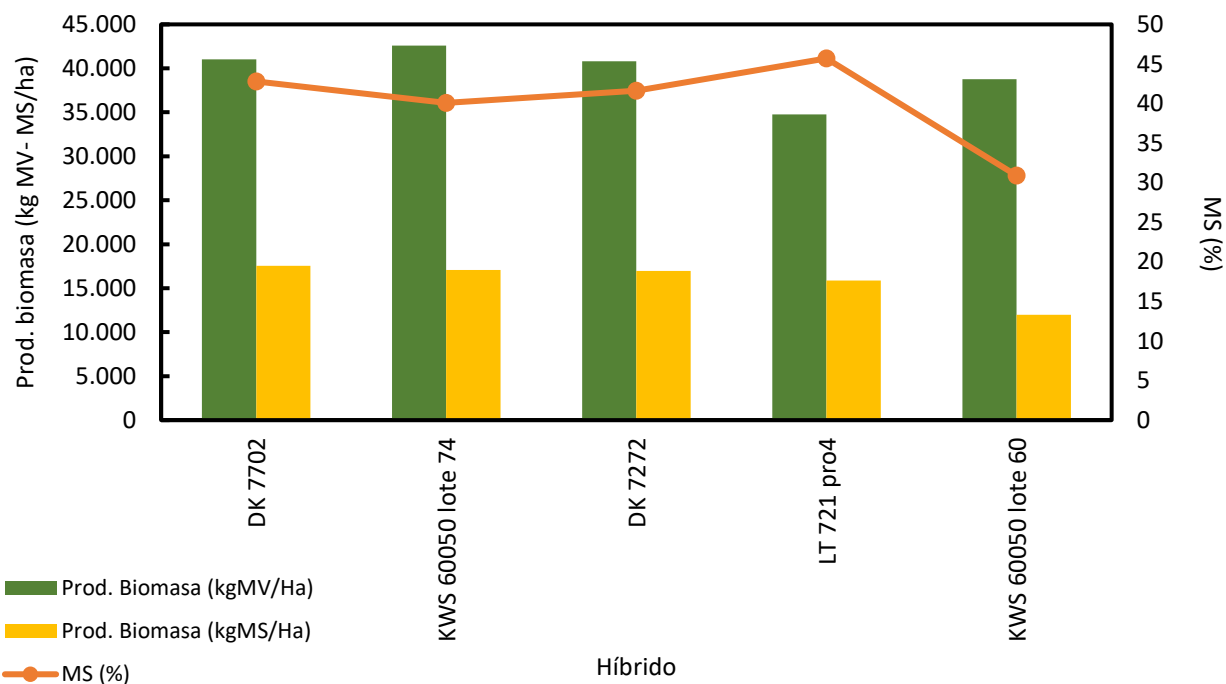


Figura 8. Producción de biomasa (kg MV/ha y kg MS/ha) y contenido de materia seca (MS; %) para los híbridos de maíz picados en Ea. San Marcos, Gral. Villegas.

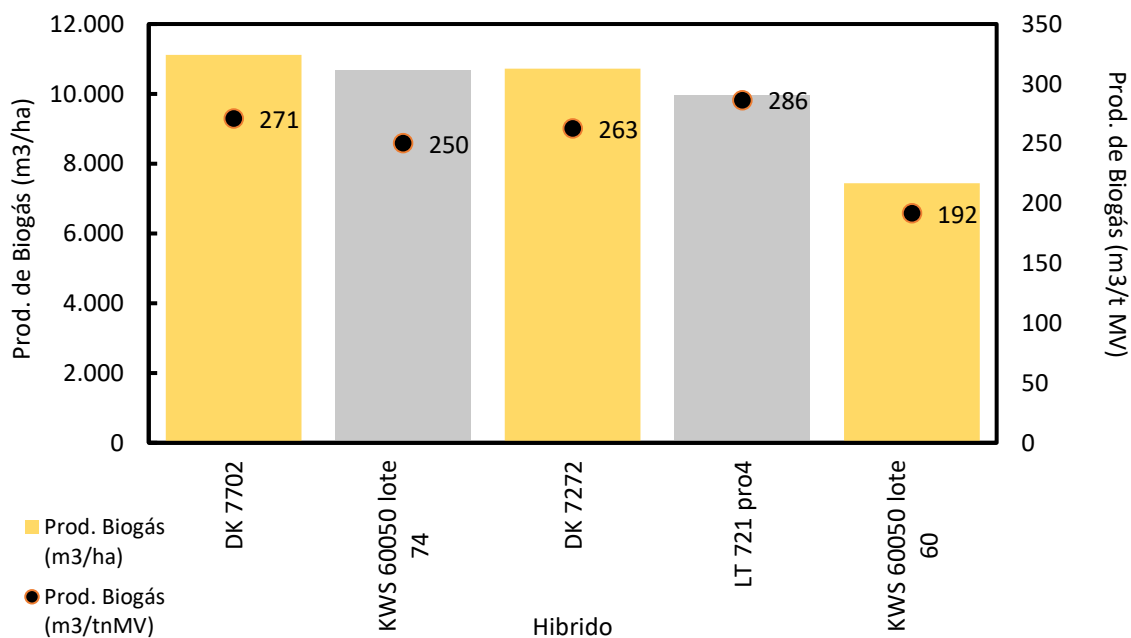


Figura 9. Potencial de biogás (m3/t MV, puntos) y Producción de biogás (m3/ha, columnas) para los híbridos de maíz picados, en el Ea. San Marcos, General Villegas.

Tabla 9. Contenido de materia seca (MS, %), Producción de biomasa (kg MS/ha), Potencial de Biogás (m³/ tMV) y Producción de biogás (m³/ha) en los materiales de maíz picados en el Ea. San Marcos, General Villegas.

Híbrido	MS (%)	Prod. Biomasa (kgMV/ha)	Prod. Biomasa (kgMS/ha)	Prod. Biogás (m ³ /t MV)	Prod. Biogás (m ³ /ha)
DK 7702	42,8	41.032	17.562	271	11.119
KWS 60050 lote 74	40,1	42.598	17.082	250	10.662
DK 7272	41,6	40.794	16.970	263	10.718
LT 721 pro4	45,7	34.762	15.886	286	9.951
KWS 60050 lote 60	30,9	38.772	11.981	192	7.436

1.5 Tasa de secado del maíz

Se evaluó la tasa de secado del cultivo de maíz correspondiente al híbrido Syn 979, sembrado a una densidad de 70.000 semillas/ha, con un objetivo de fertilización nitrogenada de 180 kg N/ha. Los muestreos para determinar el contenido de materia seca se realizaron en tres fechas: 13/03/23, 23/03/23 y 31/03/23 (Tabla 10) .

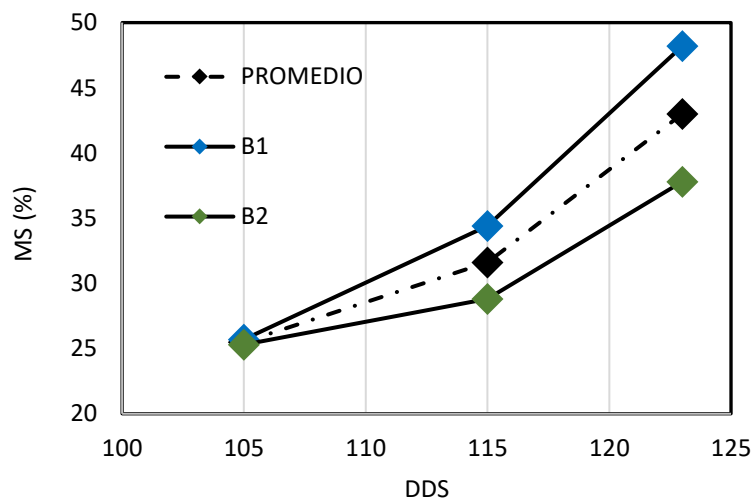
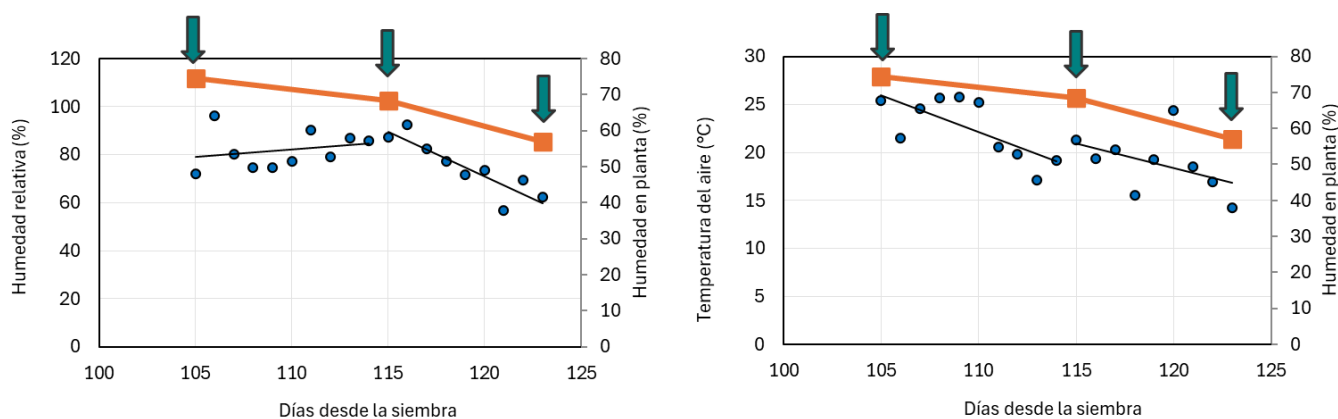


Figura 10. Evolución del contenido de materia seca (MS; %) de planta de maíz en función de los días desde la siembra (DDS) en ambos bloques (bloque1: B1 y bloque 2: B2), en el Ea. San Marcos, General Villegas.

Tabla 10. Tasa de secado de planta de maíz en Ea. San Marcos, Gral Villegas.

Fecha	Periodo	% MS/día		
		Bloque 1	Bloque 2	Promedio B1 y B2
13-03 al 23-03	1	0,87	0,35	0,61
23-03 al 31-03	2	1,73	1,13	1,43
	Promedio	1,25	0,69	0,97

Se observaron valores promedio de 0,61% MS/día y 1,43% MS/día, según la fecha de picado. La tasa de secado promedio entre los 105 y 125 días desde la siembra fue de 0,97% MS/día. La Figura 7 muestra la evolución del contenido de materia seca en función de los días desde la siembra, para dos bloques evaluados. Se aprecia un incremento en la tasa de secado durante el segundo período analizado. Este aumento en la tasa de secado se asoció principalmente con disminuciones en la humedad relativa del ambiente, como se observa en las Figuras 11a y 11b. Estas Figuras ilustran la evolución de la humedad relativa, la temperatura del aire y la humedad en la planta (inversa al contenido de materia seca) en función de los días desde la siembra, mostrando un cambio en la tendencia de la humedad relativa a partir del segundo muestreo.



Figuras 11 a y b. Evolución de la humedad relativa (figura de la izquierda), temperatura del aire (figura de la derecha) y humedad en la planta (inverso a materia seca) en función de los días desde la siembra. Las flechas indican las fechas de corte, los puntos verdes las humedad y temperatura del aire, y los cuadrados naranjas la humedad de la planta. Se observa un cambio en la tendencia de la humedad relativa a partir del segundo corte.

1.6 Nuevos cultivos bioenergéticos: Maíz de Guinea, Kenaf, Caña de Castilla.

Se realizaron ensayos con tres cultivos bioenergéticos alternativos: Maíz de Guinea, Kenaf y Caña de Castilla. Estos ensayos se implantaron en un sitio sin historial previo de aplicación de productos fitosanitarios, con el fin de evitar posibles fitotoxicidades.

Si bien no se logró una implantación exitosa de los cultivos, se pudieron realizar muestreos en plantas aisladas de Kenaf y Caña de Castilla. Lamentablemente, no fue posible muestrear el Maíz de Guinea debido a que no ocurrió la germinación de las semillas sembradas.

A pesar de las dificultades encontradas en la implantación, estos ensayos representan un primer paso en la evaluación de nuevas alternativas de cultivos bioenergéticos con potencial para su desarrollo e incorporación en sistemas productivos destinados a la generación de bioenergía.

Las muestras obtenidas de Kenaf y Caña de Castilla permitirán realizar análisis preliminares sobre su potencial productivo y calidad para el proceso de digestión anaeróbica y producción de biogás.

Tabla 11. Ficha técnica siembra de ensayo de Maíz de Guinea, Kenaf y Caña de Castilla en Ea. San Marcos, Gral. Villegas.

Cultivo	Siembra						Fertilización		Observaciones
	Especies	Procedencia del material	Fecha de siembra	Tamaño del ensayo	DEL /marco de plantación (cm)	Densidad (sem/ml)	Prof. De siembra (cm)	Fertilizante	
Maíz de Guinea	UBA	21/10/2022	11,9 m x 10 m	70	40 (objetivo 15-20 pl/m)	1,5 – 2	No		Semilla de calidad regular
Kenaf	UBA	21/10/2022	3,15 m x 10 m	70	30	1,5 - 2	No		
Caña de Castilla	UBA	21/10/2022	50 m ³	100 x 100	-	15-20	MAP	60 kg/ha	Rizomas de 10-20 cm de longitud

Los potenciales de biogás de cada cultivo se pueden ver en la tabla 12.

Tabla 12. Contenido de materia seca (MS, %) y Producción de biogás (m³/ t MV) para los cultivos de caña y kenaf en el Ea. San Marcos, Gral. Villegas.

Cultivo	MS (%)	Producción de Biogás (m ³ /t MV)
Caña sembrada	31,93	209
Kenaf	22,15	103

Resumen por cultivo- San Marcos

Tabla 13. Cultivos, promedios y rangos de potencial de biogás (m³/t MV) y producción de biogás (m³/ha) en Ea. San Marcos, Gral, evaluados en la campaña 22-23.

Cultivo	Pot. Biogás (m ³ /t MV)		Prod. Biogás (m ³ /ha)	
	Promedio	Rango	Promedio	Rango
Trigo	264	255 - 271	9.058	7.695 - 11.235
Cebada	209		6.115	
Maíz	220	147 - 324	9.618	7.272 - 12.350
Sorgo	163	125 - 189	6.689	3.880 - 9.198
Pastura	141	49 - 196	12.100	10.700 – 13.500
Caña	209			
Kenaf	103			

Al comparar los potenciales de biogás por unidad de materia verde, los cereales de invierno (trigo y cebada) mostraron valores superiores, con 264 m³/t MV para trigo, un 28% más que el promedio de maíz (220 m³/t MV) y un 61% más que el promedio de sorgo (163 m³/t MV). Si bien el trigo presentó un mayor potencial de biogás por unidad de materia verde que la cebada, esta diferencia porcentual (26,3%) fue menor que la observada en la producción por hectárea (48,1% superior en trigo). Esto sugiere que el trigo también logró una mayor producción de biomasa por superficie en comparación con la cebada.

Sin embargo, al evaluar la producción por hectárea, los cultivos estivales como el maíz (9.618 m³/ha en promedio) y el sorgo (6.689 m³/ha) presentaron rendimientos más elevados que los cereales de invierno como el trigo (9.058 m³/ha). Esto se debe a que los cultivos de verano alcanzan mayores acumulaciones de biomasa aprovechando las condiciones más favorables de radiación y temperatura.

Cabe destacar que la pastura perenne logró la mayor producción promedio de biogás por hectárea (12.100 m³/ha), superando al maíz en un 26% y al sorgo en un 81%. Esto se explica por su ciclo de crecimiento prolongado que le permite una alta acumulación de biomasa.

En cuanto a los nuevos cultivos alternativos evaluados, la Caña de Castilla mostró un potencial de biogás (209 m³/t MV) comparable al de los cereales, mientras que el Kenaf presentó un valor inferior (103 m³/t MV), similar al del sorgo. Sin embargo, no se dispone de datos de producción por hectárea para realizar comparaciones más completas.

2. Ea. Huelucán (Buena Esperanza, San Luis).

2.1 Sorgo

Se evaluaron diferentes genotipos de sorgo con distintos propósitos y características agronómicas. La siembra del ensayo de sorgo se realizó el 22 de diciembre de 2022, en el lote 2, con una densidad de 10 kg/ha y una fertilización de 60 kg/ha de urea (Tabla 14). Se evaluaron cuatro genotipos: un híbrido de doble propósito de alto contenido en azúcares (AD 91 SUCROL), un híbrido fotosensitivo BMR (135 GENTOS), un sorgo forrajero (ARSE - 01, RISSING SEEDS) y un granífero de ciclo corto (ADV 1153 SORGO) (Tabla 15). Durante el ciclo del cultivo, se presentaron adversidades climáticas como una helada el 18 de febrero de 2023, que afectó a todos los materiales, y un ataque de pulgón. El muestreo se realizó de forma manual el 28 de abril de 2023.

Tabla 14. Ficha de siembra del ensayo de sorgo en Ea. Huelucán, Buena Esperanza, San Luis.

Siembra				Fertilización	
Lote	Fecha de siembra	DEL (cm)	Densidad (kg/ha)	Fertilizante	Dosis (kg/ha)
2	22/12/2022	23	10	Urea	60

Tabla 15. Genética utilizada y características de los sorgos ensayados.

Genética	
Tipo	Nombre
Doble propósito de alto grados Brix	AD 91 SUCROL
Fotosensitivo BMR	135 GENTOS
Forrajero	ARSE – 01, RISSING SEEDS
Granífero ciclo corto	ADV 1153 SORGO

El híbrido granífero ADV 1153 se destacó alcanzando un 26% de materia seca, un 44% más que el resto de los materiales que promediaron un escaso 18%. Esto le permitió lograr un potencial de biogás de 178 m³/t MV, un 50% superior al promedio de los híbridos forrajeros (119 m³/t MV para AD 91 SUCROL y GENTOS 135, y 114 m³/t MV para RS ARSE0). Entre los híbridos forrajeros, si bien no se encontraron grandes diferencias en el potencial de biogás por tonelada de materia verde, el material AD 91 Sucrol sobresalió en la producción de biomasa, alcanzando 2.900 kg MS/ha, un 74% más que el RS ARSE0 y un 34% más que el GENTOS 135. A pesar de un muy bajo contenido de materia seca (18%) en comparación con ADV 1153 (26%), la mayor producción de biomasa del AD 91 Sucrol le permitió alcanzar una producción de biogás similar al híbrido granífero, con 1.900 m³/ha.

En términos generales, el ADV 1153 mostró el mayor potencial de biogás por unidad de biomasa, mientras que el AD 91 Sucrol se destacó por su elevada producción de biomasa y, en consecuencia, una alta producción de biogás por hectárea comparable al mejor híbrido.

Tabla 16. Producción de biomasa (kg MS/ha), contenido de materia seca (%MS) y Producción de biogás (m³/ tMV y m³/ha) de los materiales de sorgo ensayados en el Ea. Huelucán, Buena Esperanza, campaña 22-23.

Material	Producción biomasa (MS/ha)	MS (%)	Producción de Biogás (m ³ /t MV)	Producción de Biogás (m ³ /ha)
AD 91 SUCROL	2.879	18	119	1.908
ADV 1153 SORGO	2.848	26	178	1.937
GENTOS 135 SORGO	2.148	18	119	1.417
RS ARSEO	1.651	18	114	1.065

2.2 Genética de maíz para silaje

En este sitio se evaluaron materiales provenientes del ensayo de genética de maíz para silaje de las Mesas de Intercambio Ganadera y Lechera de Zona CREA Centro, así como también materiales de interés para el Proyecto de Bioenergía. La siembra del ensayo de la Red CREA se realizó el 23/12/2022, los materiales del Proyecto Bioenergía se sembraron el 21/12/2022 (Tabla 17).

Tabla 17. Ficha de siembra de los ensayos de maíz en Buena Esperanza, San Luis.

Ensayo	Siembra				Fertilización	
	Lote	Fecha de siembra	DEL (cm)	Densidad (sem/ha)	Fertilizante	Dosis (kg/ha)
Red de Maíz para Silo CREA Zona Centro	23	23/12/2022	52	45.000	Urea	100
Proyecto Bioenergía	2	21/12/2022				

Tabla 18. Genética de maíz utilizados, semilleros y sitios de muestreo.

Ensayo	Genética	
	Semillero	Material
Red de Maíz para Silo CREA Zona Centro	BREVANT	BRV 8472 PWV
	DEKALB	DK 7210 VT3P
	DEKALB	DK 7303 VT3P
	LA TIJERETA	LT 721
	NIDERA	7921 VIP3 CL
	SPS	SPS 2743 VIP3
	SYNGENTA	SYN 979 VIP3
Proyecto Bioenergía	ILLINOIS	550 VT3P*
	ILLINOIS	IS-799 VTP
	DEKALB	DK 72-72 VT3P
	LA TIJERETA	LT 720
	DEKALB	DK 77-02 TRE
	DEKALB	DK 7702
	DEKALB	DK 72-20 RR**

Debido a condiciones adversas, solo fue posible realizar el muestreo en algunos de los materiales. El híbrido DK 7702 logró la mayor producción con 13.150 kg MS/ha, un 85% más que el material de menor rendimiento DK 72-20 RR (7.100 kg MS/ha). Los potenciales de biogás se ubicaron en un rango de 208 a 234 m³/t MV. El híbrido DK 77-02 TRE alcanzó el mayor valor con 11.120 m³/ha, superando en un 50% al DK 72-20 RR que produjo 7.450 m³/ha.

En las Figuras 12 y 13 se pueden observar los rendimientos detallados de biomasa, contenidos de materia seca, potenciales y producciones de biogás para cada híbrido evaluado, diferenciando aquellos sembrados en el lote 23 (anaranjado claro) y en el lote 2 (azul).

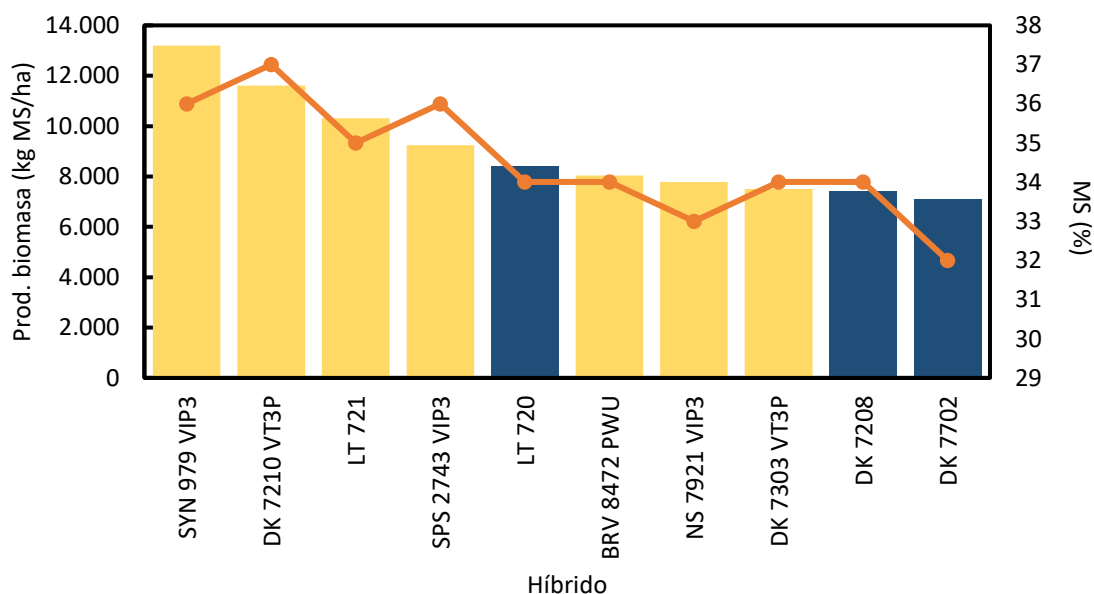


Figura 12. Producción de biomasa (kg MS/ha, columnas) y contenido de materia seca (MS; %, línea) para los híbridos de maíz picados en el Ea. Huelucán, Buena Esperanza. Las columnas azules corresponden a los materiales del ensayo Proyecto Bioenergía (lote 2) mientras que las columnas anaranjado claro a los sembrados en el lote 23.

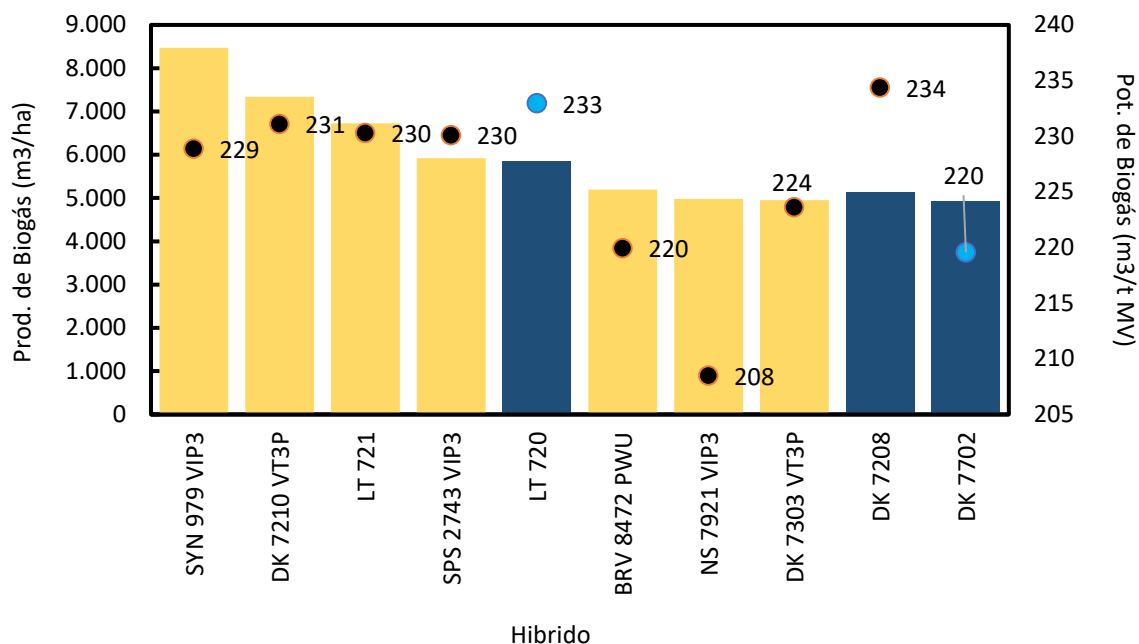


Figura 13. Potencial de biogás (m³/t MV, puntos) y Producción de biogás en (m³/ha, columnas) para los híbridos de maíz picados en el Ea. Huelucán, Buena Esperanza. Las columnas azules y puntos celestes corresponden a los materiales del ensayo Proyecto Bioenergía (lote 2), mientras que las columnas anaranjado claro y puntos negros, a los híbridos sembrados en el lote 23.

2.3 Nuevos cultivos bioenergéticos: Maíz de Guinea, Kenaf, Caña de Castilla.

En el establecimiento Huelucán de Buena Esperanza, San Luis, se realizaron ensayos con Maíz de Guinea, Kenaf y Caña de Castilla durante la campaña 2022-2023. En la Tabla 19 se detallan las condiciones de siembra para los ensayos de estos tres nuevos cultivos bioenergéticos. El Maíz de Guinea y el Kenaf se sembraron en el lote 5, con una densidad de 20 y 30 semillas/m², respectivamente. La Caña de Castilla se implantó con rizomas de 15-20 cm de longitud a una distancia de 1 m entre hileras. Lamentablemente, debido a la falta de precipitaciones y la escasez de agua en el suelo, no se logró la implantación exitosa de estos cultivos. Por este motivo, los muestreos se realizaron sobre plantas de Caña de Castilla del primer y segundo año en el establecimiento Huelucán, y sobre un cañaveral ya establecido en el campo La Soledad de la misma firma.

Tabla 19. Ficha técnica siembra de ensayo de Maíz de Guinea, Kenaf y Caña de Castilla en el Ea. Huelucán, Buena Esperanza, campaña 22-23.

Cultivo	Siembra							Observaciones
	Especies	Lote	Procedencia del material	Fecha de siembra	Tamaño del ensayo	DEL /marco de plantación (cm)	Densidad (sem/ml)	
Maíz de Guinea	5	UBA	04/11/2022	-	52	20	2	Semilla de calidad regular
Kenaf	5	UBA	04/11/2022	-	52	30	2	
Caña de Castilla	5	Ea. El Consuelo, cañaveral establecido	04/11/2022	40 m ³	100 x 100	-	15-20	Rizomas de 15-20 cm de longitud.

Tabla 20. Contenido de materia seca (MS; %) y Potencial de biogás (m³/t MV) de caña de Castilla de 1º, 2º año de producción y un cañaveral establecido.

Campo	Ensayo	MS (%)	Potencial de Biogás (m ³ /t MV)
Huelucán	Caña 1 año	38,5	198
Huelucán	Caña 2 año	39,3	208
La Soledad	Cañaveral	41,8	231

En cuanto al contenido de materia seca, se observaron valores similares, oscilando entre 38,5% para la caña de primer año en Huelucán y 41,8% en el cañaveral establecido de La Soledad. Respecto al potencial de biogás, se aprecia un incremento a medida que aumenta la edad del cultivo, siendo un 5% superior en el segundo año. El mayor potencial de biogás se obtuvo en el cañaveral establecido de La Soledad, representando un aumento del 17% en comparación con la caña de primer año y un 11% más que la de segundo año en Huelucán. Estas diferencias en el potencial de biogás podrían atribuirse a cambios en la composición bioquímica y estructural de la biomasa a medida que avanza la edad del cultivo, lo cual influye en su degradabilidad durante el proceso de digestión anaeróbica. Si bien estos resultados brindan una aproximación inicial, se requieren evaluaciones más completas y repetidas para obtener conclusiones sólidas sobre el desempeño y potencial bioenergético de la Caña de Castilla en diferentes etapas de su ciclo productivo.

2.4 Uso agronómico de digestato

Sobre cultivos de verano:

Se está llevando a cabo un seguimiento del impacto del uso de digestato como biofertilizante, evaluando su efecto tanto en los cultivos como en el suelo, en tres lotes diferentes (Tabla 21). El digestato utilizado es líquido, obtenido posterior a la separación por sistema de tornillo.

Los tratamientos evaluados son: testigo absoluto sin aplicación, dosis simple, dosis doble y dosis triple de digestato. La dosis simple fue definida en base a la cantidad necesaria para aportar el nitrógeno requerido y lograr el rendimiento objetivo del cultivo en cada lote.

Se realizaron muestreos de digestato directamente de la cisterna del equipo aplicador y análisis completos de su calidad nutricional. También se tomaron muestras de suelo georreferenciadas a diferentes profundidades para análisis previo a la aplicación. En la Tabla 21 se detallan los lotes, cultivos, antecesores, fechas de muestreo de suelo y aplicación del digestato para los ensayos de uso agronómico.

Tabla 21: Lotes, cultivos objetivos, antecesor, fechas de muestreo y de aplicación del biofertilizante en los ensayos de uso agronómico de digestato en el Ea. Huelucán, Buena Esperanza. CS= cultivo de cobertura.

Lote	Cultivo	Antecesor	Fecha muestreo de suelo	Fecha de aplicación
5	Maíz 2º silaje	Vicia cosecha	06/12/2022	20/09/2022
18	Maíz 2º silaje	CC triticale/Poroto mung	22/07/2022	18/07/2022
21	Girasol	Maíz silaje	06/12/2022	01/09/2022

Los nutrientes aportados por las diferentes dosis de digestato se presentan en la Tabla 22. Se pueden observar los aportes crecientes de nitrógeno en sus distintas fracciones (nitrato, amoniacal, orgánico), fósforo, zinc, boro y potasio a medida que aumenta la dosis aplicada.

Tabla 22: Principales nutrientes aportados en los diferentes tratamientos.

Elemento y su fracción (kg/ha)	Dosis simple	Dosis doble	Dosis triple
N-nitratos	11	23	34
N-orgánico	66	131	197
N-amoniacal	54	109	164
N total	132	263	395
P total	22	43	65
Zn	2,8	5,6	8,4
B	0,8	1,6	2,5
K	54	108	162

En la Figura 14 se muestra el contenido de fósforo Bray a diferentes profundidades de suelo para cada tratamiento. Aún no se observan diferencias claras entre los tratamientos, lo cual puede deberse al corto tiempo transcurrido desde la aplicación del digestato. Estos ensayos permiten evaluar la factibilidad del uso del digestato como fuente de nutrientes, su impacto en la fertilidad del suelo y el rendimiento de distintos cultivos de importancia para la región.

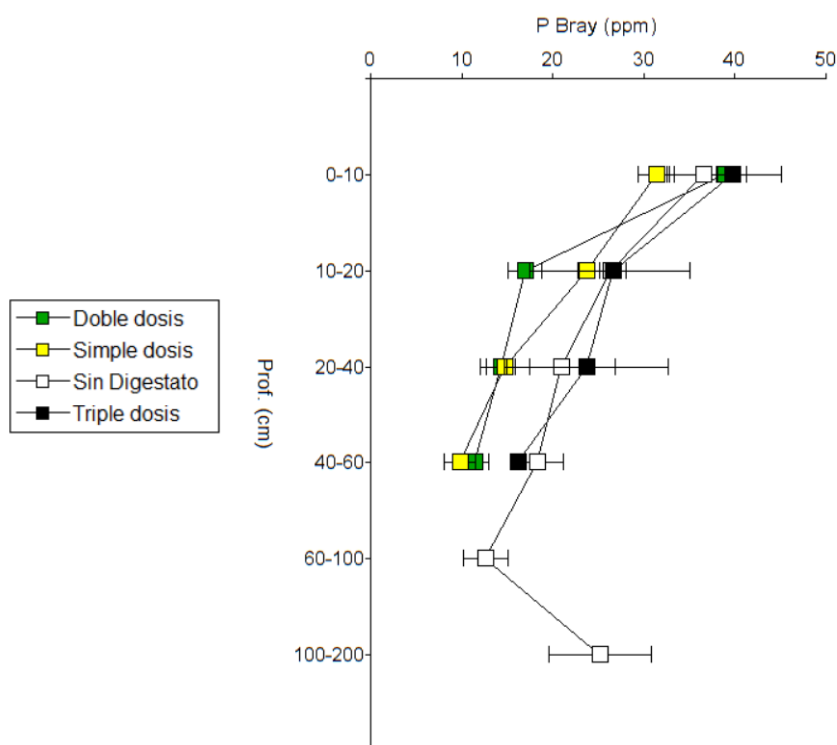


Figura 14. Contenido de fósforo Bray (ppm) a diferentes profundidades (cm) de suelo en los distintos tratamientos de uso agronómico de digestato: Sin Digestato (cuadrados blancos), Simple Dosis (cuadrados amarillos), Doble Dosis (cuadrados verdes) y Triple Dosis (cuadrados negros), en Ea. Huelucán, Buena Esperanza.

No se encontraron diferencias significativas a nivel de rendimientos de los diferentes cultivos evaluados en los ensayos con dosis crecientes de digestato. Sin embargo, al analizar lotes de producción comercial, se observaron mayores rendimientos en el cultivo de girasol en el que se había aplicado digestato (100 ha) en comparación con los siete lotes sin aplicación, que sumaban 868 ha. Luego, se buscó comparar rendimientos de girasol en lotes con y sin aplicación de digestato, que tuvieran similar historial de uso, rotación y tipo de suelo.

La Tabla 23 muestra los rendimientos promedio de grano de girasol y diferencia del lote sin aplicación de digestato con similares características al al con aplicación (L34) y de los siete lotes sin aplicación de digestato (incluido el L34), respecto al lote fertilizado con digestato. Se puede apreciar un incremento de 598 kg/ha (42%) en el rendimiento del lote fertilizado con digestato en comparación con aquellos sin aplicación y 521 kg/ha (35%) de diferencia del lote con aplicación, respecto al 34.

Estos resultados sugieren que, si bien en los ensayos con distintas dosis no se observaron diferencias, la aplicación de digestato en lotes de producción comercial de girasol podría estar teniendo un efecto positivo en los rendimientos. Se requieren profundizar en el estudio de las dosis óptimas y momentos de aplicación más convenientes.

Tabla 23: Rendimiento promedio de grano del cultivo de girasol de los lotes con y sin aplicación de digestato y diferencia de rendimiento entre ellos, en la Ea. Huelucán, Buena Esperanza, San Luis.

Fertilización	Superficie (ha)	Rto. girasol (kg/ha)	Diferencia Rto. respecto al L21 (kh/ha)	
Con digestato L21	100	2.011		
Sin digestato L34B	132	1.490	-521	35%
Sin digestato (todos los lotes)	868	1.413	-598	42%

Resumen por cultivo – Huelucán

Tabla 24: Cultivos, promedios y rangos de potencial de biogás (m³/t MV) y rendimiento de biogás (m³/ha) en Ea. Huelucán, Buena Esperanza, San Luis, campaña 22-23.

Cultivo	Pot. Biogás (m ³ /t MV)		Prod. Biogás (m ³ /ha)	
	Promedio	Rango	Promedio	Rango
Maíz	215	196 - 234	5.810	3.298 - 9.007
Sorgo	133	114 - 178	1.580	1065 -1.937
Caña	213	198 - 231		

Respecto al potencial de biogás (m³/t MV), El maíz presentó el mayor potencial promedio, seguido por la caña de Castilla, mientras que el sorgo mostró el menor potencial, un 38% inferior al maíz. El rango de potenciales fue más amplio en el sorgo (114 a 178 m³/t MV) en comparación con el maíz (196 a 234 m³/t MV).

Evaluando la producción de biogás por hectárea, el maíz alcanzó la mayor producción promedio, casi cuatro veces superior a la del sorgo. Esta mayor producción en el maíz se asocia a sus mayores rendimientos de biomasa por hectárea. Al comparar los dos cultivos estivales, el maíz superó ampliamente al sorgo tanto en potencial de biogás

(62% mayor) como en producción por hectárea (268% más). Esto indicaría un mayor potencial bioenergético del maíz en las condiciones evaluadas.

Respecto a la caña de Castilla, si bien mostró potenciales similares al maíz, no se disponen datos de su producción por superficie para realizar una comparación más completa. No obstante, sus potenciales la ubican como una alternativa promisoría a evaluar más profundamente. En síntesis, el maíz se perfila como el cultivo con mejor performance bioenergética, seguido por la caña de Castilla y en último lugar el sorgo, en base a los parámetros evaluados.

3. Ea. El Triunvirato. (Monte Maíz)

3.1 Cultivos invernales anuales.

Durante la campaña 2022-2023, se realizaron mediciones en lotes de producción de cultivos invernales consociados de vicia villosa con raigrás y vicia villosa con centeno en el establecimiento El Triunvirato de Monte Maíz. Los detalles de la siembra y fertilización se presentan en la Tabla 25

Tabla 25: Ficha técnica siembra de cultivos invernales, Ea. El Triunvirato, Monte Maíz, campaña 22-23.

Siembra				Fertilización		
Especies	Lote	Fecha de siembra	Densidad cult. 1 y culti. 2 (kg/ha)	Fertilizante	Dosis (kg/ha)	Digestato sin separar (m3/ha)
Vicia villosa + Raigrás	10	28-03	20 + 16	7.7-42.1-00-CA06-S3.6	80	20
Vicia villosa + Centeno	11	28-03	15 + 15	7.7-42.1-00-CA06-S3.6	80	20
Vicia villosa + Centeno	12	28-03	15 + 15	7.7-42.1-00-CA06-S3.6	80	20
Vicia villosa + Centeno	VARA	28-03	15 + 15	7.7-42.1-00-CA06-S3.6	80	20

El muestreo para determinar los rendimientos de biomasa, potenciales de biogás y metano se llevó a cabo el 28 de abril de 2023, cuando la vicia se encontraba en prefloración y el centeno en estado de grano lechoso (Tabla 26). Las producciones de biomasa variaron entre 3.300 y 18.800 kg MV/ha, alcanzando los mayores valores en la consociación vicia villosa + raigrás, mientras que la menor producción se obtuvo en una consociación vicia villosa + centeno. Los potenciales de biogás oscilaron entre 158 y 307 m3/t MV, siendo la consociación vicia villosa + centeno la que presentó el mayor potencial. En cuanto al rendimiento de metano por hectárea, nuevamente la vicia villosa + centeno se destacó. En términos generales, las mezclas de vicia villosa con centeno presentaron un mejor desempeño bioenergético en comparación con la combinación vicia villosa + raigrás en las condiciones evaluadas.

Tabla 26: Producción de biomasa (kg MV/ha, kg MS/ha), contenido de materia seca (%MS), Producción de biogás (m³/tMV), concentración de metano (%) y rendimiento de metano (m3/ha) de los cultivos de invierno de Ea. El Triunvirato, Monte maíz.

Especies	Lote	Rendimiento de biomasa				Producción de metano			
		Estadío del cultivo al momento de picado	Prod. Biomasa (kgMV/ha)	MS (%)	Prod. biomasa (kgMS/ha)	Potencial de biogás (m3/t MV)	%CH4	Potencial metanogénico (m3/t MV)	Rendimiento (m3 CH4/ha)
Vicia v.+ raigrás	10	vicia prefloración	18.763	31	5.817	158	57%	90	1.690
Vicia v. + Centeno	11	vicia prefloración, centeno grano lechoso	11.181	54	6.038	281,5	56%	158	1.763
Vicia v. + Centeno	12	vicia prefloración, centeno grano lechoso	12.330	59	7.275	307	57%	175	2.158
Vicia v. + Centeno	VARA	vicia prefloración, centeno grano lechoso	3.291	39	1.267	197	57%	111	366

3.2 Genética de sorgo para silaje

Se llevó a cabo un ensayo de evaluación de diferentes genotipos de sorgo destinados a la producción de silaje durante la campaña 2022-2023. Este ensayo se realizó en un ambiente considerado de potencial productivo medio en comparación con los lotes de mayor aptitud del establecimiento. La siembra del ensayo se efectuó el 16 de noviembre de 2022 en el lote "Cañada Este" (Tabla 27). Se evaluaron cinco genotipos de sorgo de distintas características, como se detalla en la Tabla 28: dos híbridos de doble propósito (AD 91 SUCROL y ADV 422), dos fotosensitivos (130 GENTOS azucarado y 135 GENTOS BMR) y un granífero BMR (95 GENTOS).

Tabla 27: Ficha técnica siembra del ensayo en Ea. El Triunvirato, Monte Maíz.

Siembra			Fertilización	
Lote	Fecha de siembra	DEL (cm)	Fertilizante	Dosis (kg/ha)
Cañada Este	16/11/2022	35	7.7-42.1-00-CA06-S3.6	100

Tabla 28: Genética y densidades utilizadas.

Genética		Siembra
Tipo	Nombre	Densidad (mil pl/ha)
Doble propósito de alto grados Brix	AD 91 SUCROL	180
Fotosensitivo azucarado	130 GENTOS	140
Fotosensitivo BMR	135 GENTOS	140
Granífero BMR	95 GENTOS	160
Doble propósito	ADV 422	180

En la Tabla 29 se presentan los resultados de contenido de materia seca, producción de biomasa, potencial y rendimiento de biogás para cada uno de los materiales evaluados. Se observa que los híbridos de doble propósito AD 91 SUCROL y ADV 422 alcanzaron los mayores porcentajes de materia seca al momento del muestreo. Estos mismos genotipos, junto con el 95 GENTOS, se destacaron por sus elevadas producciones de biomasa que oscilaron entre 12.300 y 15.000 kg MS/ha. En consecuencia, también lograron los mayores rendimientos de biogás, superando los 7.500 m³/ha. Por su parte, los fotosensitivos 130 GENTOS y 135 GENTOS presentaron menores contenidos de materia seca, producciones de biomasa y en consecuencia rendimientos de biogás más bajos, por debajo de los 5.000 m³/ha.

Tabla 29: Contenido de materia seca (%MS), Producción de biomasa (kg MS/ha), Potencial de biogás (m³/ tMV) y producción de biogás (m³/ha) de los diferentes híbridos de sorgo de Ea. El Triunvirato, Monte maíz.

Material	MS (%)	Producción (MS/ha)	Producción de Biogás (m ³ /t MV)	Producción de Biogás (m ³ /ha)
95 GENTOS	32	14.946	197	9.327
AD 91 SUCROL	31	14.537	198	9.189
ADV 422	36	12.333	218	7.537
130 GENTOS	23	8.762	121	4.632
135 GENTOS	17	4.935	79	2.274

3.3 Uso agronómico de digestato.

Se llevó a cabo un ensayo para evaluar el efecto del uso de digestato como fertilizante sobre cultivos invernales anuales y maíz.

Sobre cultivos anuales de invierno:

La evaluación se realizó en un cultivo consociado de centeno y vicia. Se evaluaron diferentes tratamientos que combinaban la fertilización con fósforo en línea mediante un fertilizante mezcla 7.7-42.1-00-CA06-S3.6 (80 kg/ha), digestato sólido (8 t/ha) y digestato líquido (20 m3/ha). También se incluyó un tratamiento testigo sin aplicación de digestato.

Tabla 30: Rendimiento de biomasa (kg MV/ha, kg MS/ha), contenido de materia seca (%MS), Potencial de biogás (m³/tMV), concentración de metano (%), Potencial de metano (m³/tMV) y rendimiento de metano (m³/ha) de un cultivo consociado vicia-centeno, sembrado en los distintos tratamientos de uso de digestatos, en Ea. El Triunvirato, Monte maíz. S: digestato sólido, 8 t/ha; L: digestato líquido 20 m3/ha; Mz: 80 kg/ha fertilizante en mezcla 7.7-42.1-00-CA06-S3.6; Testigo: sin aplicación. MV: materia verde; MS: materia seca.

Fertilización	Rendimiento de biomasa			Producción de metano			
	Rto MV (kg/ha)	MS (%)	Rto MS (kg/ha)	Potencial de biogás (m ³ /t MV)	%CH4	Potencial metanogénico (m ³ /t MV)	Rendimiento (m ³ CH ₄ /ha)
S + L + PL	18.074	52,6	9.507	264	58	153	2.767
S + L + PL	15.778	49,5	7.810	257	56	144	2.271
L + PL	15.778	44,8	7.069	218	57	124	1.961
PL	16.667	49,7	8.283	249	56	139	2.324
S + L + PL	17.037	40,6	6.917	203	56	114	1.937
Testigo	16.222	47,5	7.696	213	56	119	1.935

No se observaron grandes diferencias en los rendimientos de biomasa entre tratamientos, los cuales oscilaron entre 15.800 y 18.000 kg MV/ha. Los potenciales de biogás variaron entre 203 y 264 m³/t MV, mientras que los potenciales metanogénicos se ubicaron en un rango de 114 a 153 m³ CH₄/t MV. El tratamiento con ambos digestatos y fertilizante en línea alcanzó los valores más elevados. En cuanto a la producción de metano por hectárea, nuevamente este tratamiento combinado se destacó, aunque con valores similares a la aplicación de digestato líquido + fertilizante y de sólo fertilizante en línea. Estos resultados sugieren que la aplicación combinada de digestatos sólido y líquido junto con la fertilización fosforada podría tener un leve efecto positivo sobre el rendimiento y calidad de la biomasa para biogás en este cultivo invernal.

Sobre maíz:

Se realizó un ensayo sobre un lote con maíz con destino silaje con las mismas combinaciones de fertilización que en los cultivos de invierno, a los cuales se adicionó tratamiento con doble dosis de digestato líquido (L) + doble dosis de digestato sólido (S).

Tabla 31: Ficha técnica siembra del ensayo de maíz para evaluar uso agronómico de digestato. DEL: distancia entre hileras

Siembra			
Fecha de siembra	DEL (cm)	Densidad (sem/ha)	Genética
17/12/2022	52	61.540	KWS 4850

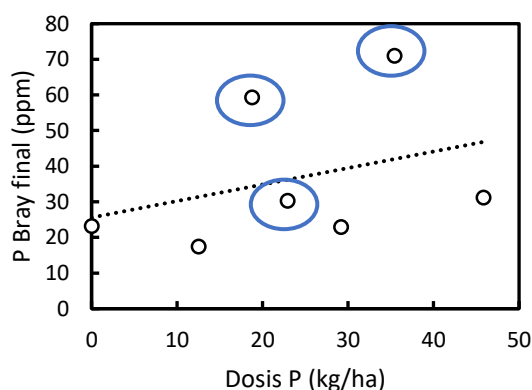
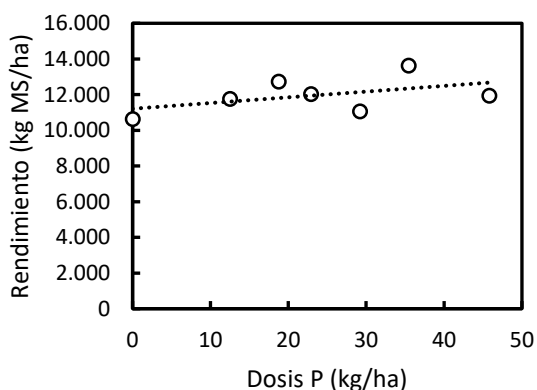
Si bien el tratamiento testigo fue el de menor producción, no se encontraron fuertes interacciones entre nutrientes aplicados y rendimientos (Tabla 32).

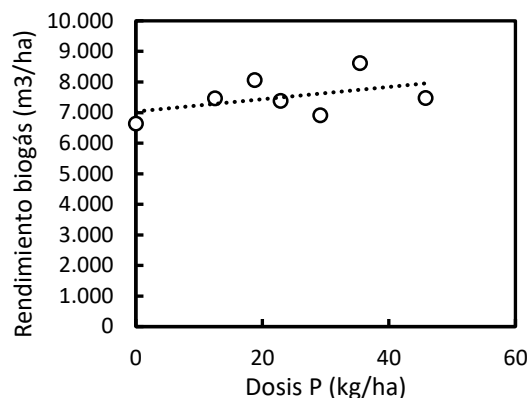
Tabla 32: Aportes de fósforo (P), nitrógeno (N) y azufre (S) en kg/ha, rendimiento de biomasa (kgMS/ha), potencial de biogás (m³/t MV) y producción de biogás (m³/ha) de maíz obtenido utilizando diferentes combinaciones de

digestato y fertilizantes comerciales, en Ea. El Triunvirato, Monte Maíz. S: digestato sólido, 8 t/ha; L: digestato líquido 20 m3/ha; Mz: 80 kg/ha fertilizante en mezcla 7.7-42.1-00-CA06-S3.6; U: 250 kg/ha urea; Testigo: sin aplicación.

Tratamiento	P aplicado (kg/ha)	N aplicado (kg/ha)	S aplicado (kg/ha)	Rto. biomasa (kgMS/ha)	Potencial de Biogás (m ³ /t MV)	Producción biogás (m ³ /ha)
S+L+Mz	35	116	11	13.611	223	8.613
S+Mz	19	45	4	12.729	232	8.066
S+L	23	109	10	12.022	214	7.379
2S+2L	46	219	21	11.931	205	7.480
Mz+U	13	121	1	11.747	226	7.463
L+Mz	29	77	8	11.060	241	6.912
TESTIGO	0	0	0	10.632	224	6.640

El tratamiento S+L+Mz obtuvo la mayor producción de biogás, lo que representó un aumento del 29,7% en comparación con el tratamiento testigo sin aplicación de nutrientes. Este alto rendimiento estuvo impulsado principalmente por el mayor rendimiento de biomasa, ya que su potencial de biogás no fue el más alto entre los tratamientos. Por otro lado, el segundo tratamiento más productivo, S+Mz, 21,5% más que el testigo, tuvo un alto potencial de biogás (232 m3/t MV) pero un rendimiento de biomasa ligeramente inferior en comparación con S+L+Mz. Esto sugiere que, en este caso, el alto potencial de biogás compensó un rendimiento de biomasa ligeramente menor. El tratamiento L+Mz, con apenas 4,1% más que el testigo, mostró el mayor potencial de biogás (241 m3/t MV), pero un rendimiento de biomasa relativamente bajo. Aquí, el alto potencial de biogás no pudo compensar el bajo rendimiento de biomasa, dando como resultado una producción de biogás solo ligeramente superior al testigo. Estos resultados sugieren que tanto el rendimiento de biomasa como el potencial de biogás contribuyeron a la producción de biogás, pero el rendimiento de biomasa parece haber sido el factor más determinante en los tratamientos de mayor producción. Sin embargo, en algunos casos, como S+Mz, un alto potencial de biogás pudo compensar un rendimiento de biomasa ligeramente inferior.





Figuras 15 a,b y c. a: Rendimiento de biomasa de maíz (kgMS/ha) en función del P aplicado; b: Contenido de P Bray (ppm) en suelo en función del P aplicado; c: Rendimiento de biogás del picado de maíz (m³/ha) en función del P aplicado, en Ea. El Triunvirato, Monte Maíz.

Si bien no se encontraron interacciones fuertes entre los nutrientes aplicados y los rendimientos, el fósforo (P) pareció ser el nutriente que más influyó positivamente en el rendimiento de materia seca y la producción de biogás por hectárea (Figuras 15 a, b y c). Se observó una leve tendencia al aumento de 32 kg de materia seca y 20 m³/ha de biogás por cada kg adicional de P aplicado. Los tratamientos que incluyeron digestato sólido, rico en P, registraron los mayores contenidos finales de P Bray en el suelo (Figura 15. b., círculos azules) y tendieron a obtener los rendimientos más altos. En consecuencia, la adecuada disponibilidad de fósforo, especialmente a partir del digestato sólido, parece haber sido clave para maximizar el rendimiento de biomasa y producción de biogás en este cultivo de maíz.

Análisis económico

Se realizó el análisis económico del uso agronómico del digestato (S+L). Se consideraron los aportes de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S), ya que son los nutrientes más comúnmente aplicados en forma de fertilizantes. La Tabla 33 muestra el equivalente en cantidad de fertilizantes comerciales (kg) y su valor de mercado (USD) correspondiente a la dosis simple de digestato sólido y líquido utilizadas en el ensayo. SPT: super fosfato triple; S: azufre. Los precios considerados fueron: urea 898 USD/t, SPT 925 USD/t y yeso 275 USD/t. El ahorro en fertilizantes utilizando el tratamiento S+L fue de 276 USD/ha en total. Además, en el ensayo, este tratamiento rindió 274 kg MS/ha más que el tratamiento Mz+U. Por otro lado, el costo de las labores de aplicación fue de 22 USD/ha tanto para el digestato líquido como para el sólido.

Tabla 33: Equivalente en cantidad de fertilizantes comerciales (kg) y su valor de mercado (USD) de la dosis simple de digestato sólido y líquido utilizadas en el ensayo. SPT: super fosfato triple; S: azufre.

Tratamiento	Eq SPT (kg)	Eq urea (kg)	Eq ferti S (kg)	Eq USD urea	Eq USD SPT	Eq USD S	USD total
S+L	48	237	71,1	213	44	20	276

Resumen por cultivo – El Triunvirato

Tabla 34: Cultivos, promedios y rangos de potencial de biogás (m³/t MV) y producción de biogás (m³/ha) en Ea. El Triunvirato, campaña 22-23.

Cultivo	Pot. Biogás (m ³ /t MV)		Prod. Biogás (m ³ /ha)	
	Promedio	Rango	Promedio	Rango
Vicia + Centeno	236	158 - 307	2.636	648 - 3.785
Maíz	272	205 - 337	9.200	6.640 - 13.093
Sorgo	163	79 - 218	6.592	2.274 - 9.327

Los resultados de la campaña 22-23 en Ea. El Triunvirato mostraron diferencias notables en el potencial de biogás y la producción de biogás entre los cultivos evaluados. El cultivo de maíz presentó el mayor potencial de biogás promedio, superando en un 15% al promedio de la vicia + centeno y en un 67% al del sorgo. En cuanto a la producción de biogás por hectárea, el maíz también lideró con un 250% más que la vicia + centeno y un 40% más que el sorgo. Sin embargo, los rangos de variación fueron amplios, con el maíz oscilando entre 6.640 y 13.093 m³/ha, el sorgo entre 2.274 y 9.327 m³/ha, y la vicia + centeno entre 648 y 3.785 m³/ha. Estas diferencias subrayan la importancia de la selección del cultivo para optimizar el potencial y la producción de biogás.

Nitrógeno x Densidad en maíz para silaje

Se llevaron a cabo dos ensayos de Nitrógeno x Densidad (NxD) en maíz para silaje, uno en el Establecimiento San Marcos, General Villegas, y otro en el Establecimiento El Triunvirato, Monte Maíz. El criterio de selección de los tratamientos de los ensayos de NxD fue considerar la densidad de siembra utilizada en cada campo, más un 30% y menos un 30%, así como niveles de nitrógeno (N) según los utilizados en el campo e investigaciones previas sobre fertilización de maíces con destino a silaje.

San Marcos, General Villegas.

Tabla 35: Ficha técnica de siembra del ensayo de NxD para maíz en Ea. San Marcos, Gral. Villegas.

Siembra			Fertilización		Fertilizante	Dosis (kg/ha)
Lote			Fecha de siembra	DEL (cm)		
64	28/11/2022	70	Syn 979	MAP	60	

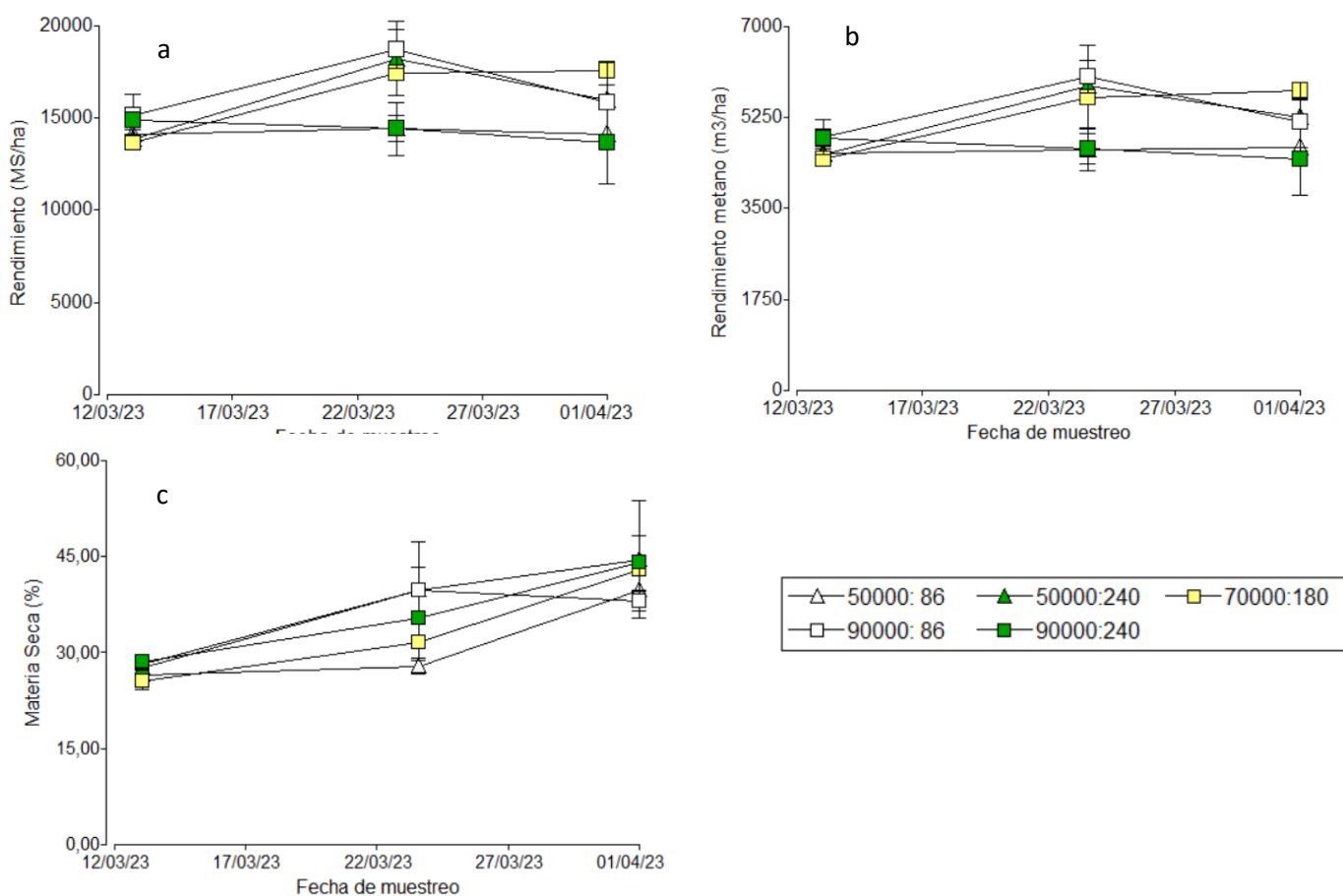
NIVEL DE N (kg/ha)	86 N →			
	180 N →			
	200 N →			
	240 N →			
	↑	↑	↑	
	90000 s/ha	70000 s/ha	50000 s/ha	
	DENSIDAD DE SIEMBRA (sem/ha)			

El ensayo se realizó en bloques al azar, con distintas densidades y niveles de N y sus respectivas combinaciones (Figura16). El nitrógeno en el suelo fue de 86 kg/ha, y la aplicación de N se realizó al voleo con urea el día 14-12-22, cuando el cultivo se encontraba en estado fenológico V4. Los muestreos se realizaron a mano en tres fechas: 13, 23 y 31 de marzo, sobre los tratamientos extremos y el intermedio que representaba el manejo del productor (50.000 – 86, 50.000 – 240, 70.000 – 180, 90.000 – 86 y 90.000 – 240).

Figura 16: Tratamientos del ensayo de NxD de maíz, Ea. San Marcos, Gral. Villegas.

No se observaron diferencias claras entre los tratamientos de NxD a lo largo de las tres fechas de muestreo. Todos los tratamientos muestran un aumento gradual en el rendimiento de biomasa desde la primera fecha hasta la última, lo cual es esperable a medida que el cultivo avanza en su ciclo. Sin embargo, no hay un tratamiento que se destaque significativamente por encima de los demás en términos de producción de biomasa. Al igual que en el rendimiento de biomasa, no se aprecian diferencias notorias entre tratamientos de NxD para el rendimiento de metano. Nuevamente, todos los tratamientos siguen una tendencia creciente a medida que avanza el ciclo del cultivo, pero sin una superioridad evidente de alguna combinación particular de densidad y dosis de nitrógeno.

En el contenido de materia seca (%MS), en las dos primeras fechas de muestreo, el tratamiento 90.000-240 (alta densidad y alta dosis de N) mostró los valores más bajos de %MS en comparación con los demás. Sin embargo, en la última fecha de muestreo, este tratamiento se ubicó en un nivel intermedio. Por otro lado, el tratamiento 50.000-86 (baja densidad y baja dosis de N) presentó consistentemente los mayores contenidos de %MS a lo largo de los tres muestreos.



Figuras 17. (a) Rendimiento en biomasa (kgMS/ha), (b) Rendimiento de metano (m3/ha) y (c) Contenido de materia seca (%MS) en función de la fecha de muestreo de los diferentes tratamientos de NxD en maíz, en Ea. San Marcos, Gral. Villegas.

El Triunvirato, Monte Maíz.

Para este ensayo se utilizó un híbrido KWS 695, sembrado a 52 cm entre líneas, con una dosis de fertilizante de 100 kg/ha de una mezcla (Tabla 36). El contenido de nitrógeno en el suelo a la siembra era de 180 kg/ha. El ensayo se realizó en dos bloques al azar, evaluando diferentes combinaciones de densidades de siembra (49.000, 68.000 y 88.000 semillas/ha) y niveles de nitrógeno (Figura 18). Se muestreó tanto planta entera como grano y se estimaron las producciones para picado de silaje y cosecha, respectivamente

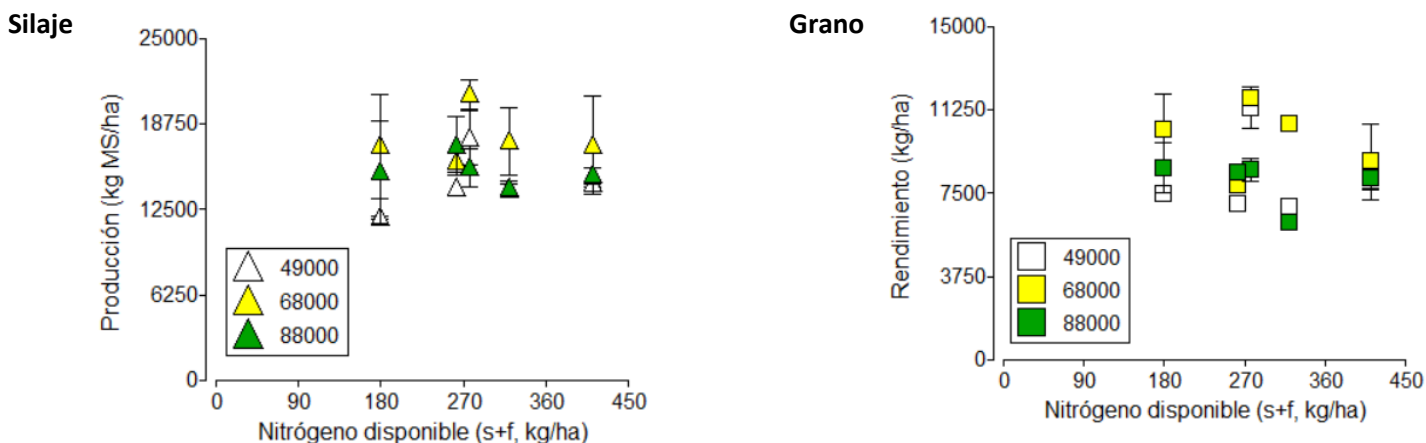
Tabla 36: Ficha técnica de siembra del ensayo de NxD para maíz en Ea. El Triunvirato, Monte Maíz.

Siembra			Fertilización	
Fecha de siembra	DEL (cm)	Genética	Fertilizante	Dosis (kg/ha)
22/11/2022	52	KWS 695	7.7-42.1-00-CA06-S3.6	100

NIVEL DE N (kg/ha)	121 →			
	232 →			
	0 →			
	97 →			
	83 →			
		↑	↑	↑
		49.000	88.000	68.000
		DENSIDAD DE SIEMBRA (sem/ha)		

Figura 18: Tratamientos del ensayo de NxD en maíz, Ea. El Triunvirato, Monte Maíz.

En cuanto a la producción de biomasa para silaje (Figura 19a), no se observa una tendencia clara ni interacción evidente entre el nivel de nitrógeno y la densidad de siembra. Los rendimientos parecen fluctuar alrededor de un promedio similar, sin una respuesta consistente al aumento de la disponibilidad de nitrógeno o la densidad de siembra. De manera similar, en el rendimiento en grano no se aprecia una tendencia definida ni interacción significativa entre el nivel de nitrógeno y la densidad de siembra (Figura 19b). Los rendimientos en grano parecen variar dentro de un rango similar, sin una respuesta consistente al aumento del nitrógeno disponible o la densidad de siembra.



Figuras 19 a y b: (a) Producción de biomasa (kgMS/ha) y (b) rendimiento en grano (kg/ha), de maíz en función del nitrógeno disponible de suelo + fertilizante (kg/ha), en las densidades de 49.000, 68.000 y 88.000 sem/ha en Ea. El Triunvirato, Monte Maíz.

Las densidades de siembras óptimas para ambos ensayos (El Triunvirato y San Marcos) estuvieron entre 65.000 y 70.000 sem/ha. A pesar de esto, en estos ensayos particulares no se evidenció una respuesta contundente a las variaciones en la densidad de siembra dentro de este rango, ni una interacción significativa con los niveles de nitrógeno aplicados.

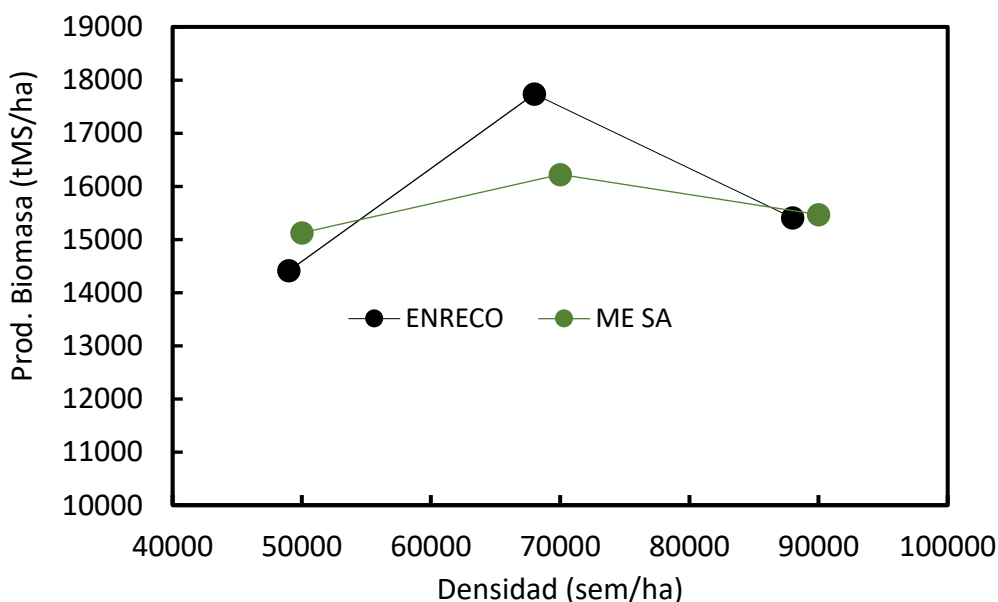


Figura 20. Producción de biomasa de maíz (tMS/ha) en función de la densidad de siembra (sem/ha), resultado de los ensayos Nx D de los Ea. San Marcos, Gral. Villegas y Ea. El Triunvirato, Monte Maíz.

¿De qué depende la producción de biogás?

El potencial de biogás estuvo, al igual que en estudios anteriores, altamente influenciado por el contenido de materia seca del material (Figura 21). Otro de los parámetros de relevancia fue el TND (total de nutrientes digestibles, Figura 22) el cuál fue explicado principalmente por los contenidos de almidón, FDA, FDN y carbohidratos no fibrosos (Figuras 23 a, 23 b, 23 c, 23 d).

Por su parte, el parámetro que más explicó la producción de biogás por ha fue el rendimiento en materia seca del cultivo (Figura 24) y en menor medida el potencial de biogás (Figura 25).

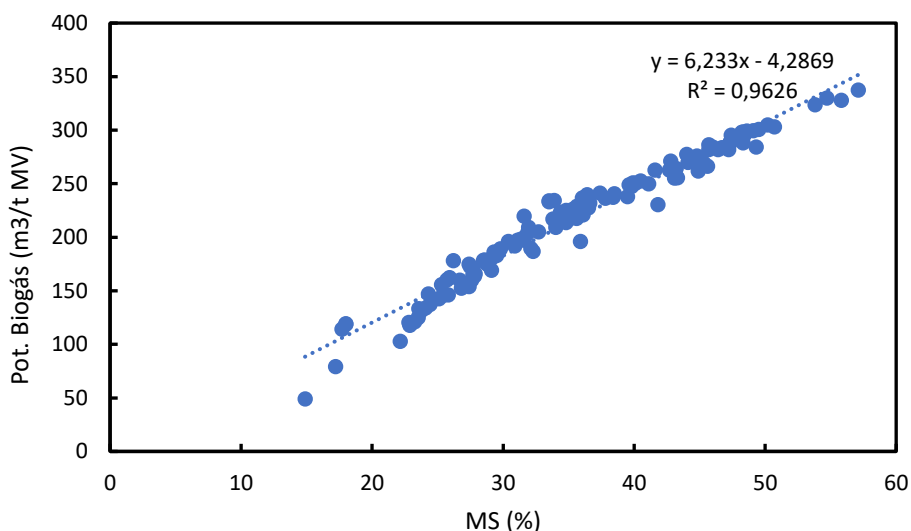


Figura 21. Contenido de materia seca de la biomasa y potencial de biogás (m³/t MV).

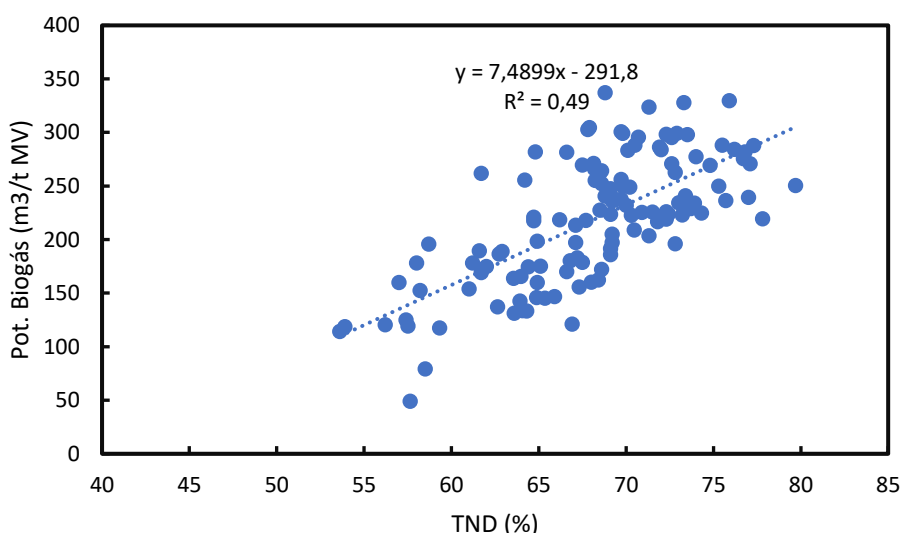


Figura 22. Total de nutrientes digestibles (TND, %) y potencial de biogás (m³/t MV).

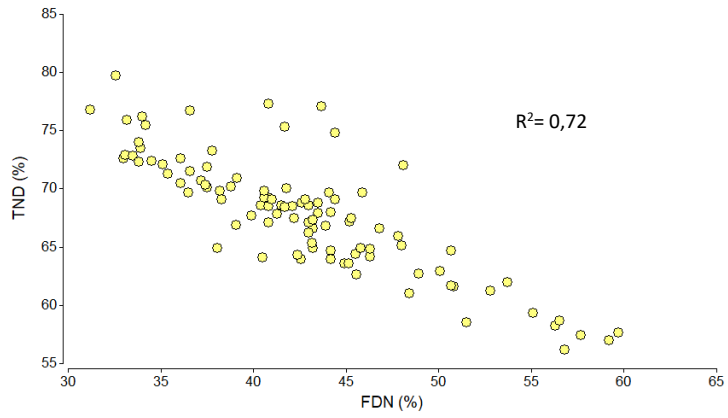


Figura 23 a. Contenido de fibra detergente neutro (FDN, %) y Total de nutrientes digestibles (TND, %).

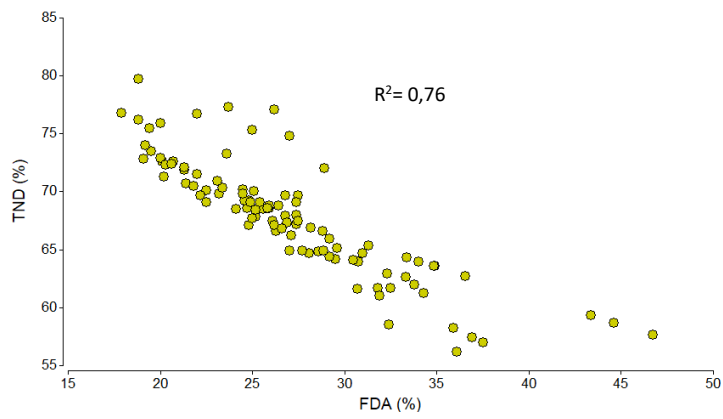


Figura 23 b. Contenido de fibra detergente ácido (FDA, %) y Total de nutrientes digestibles (TND, %).

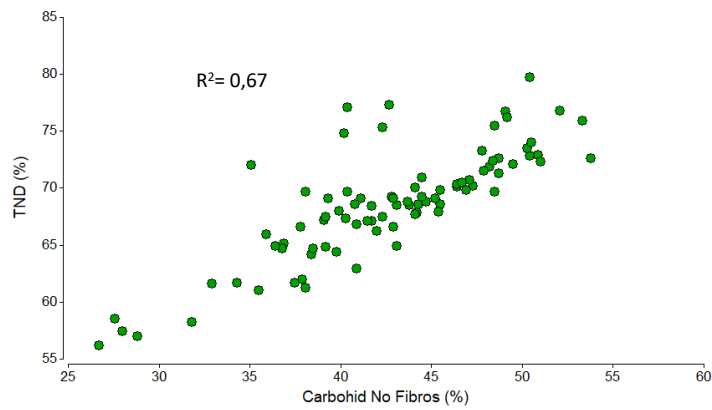


Figura 23 c. Contenido de carbohidatos no fibrosos (%) y Total de nutrientes digestibles (TND, %).

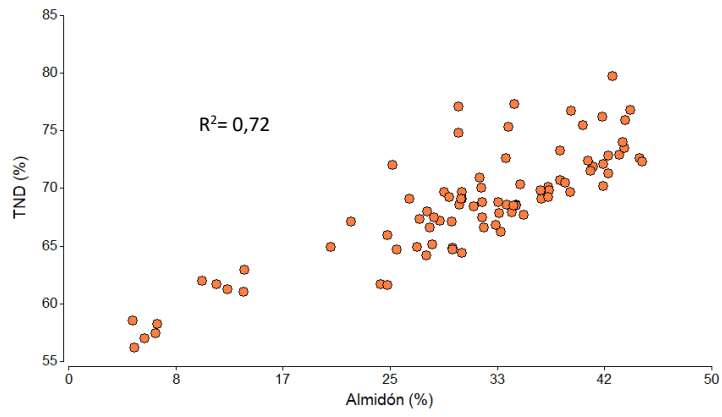


Figura 23 d. Contenido de almidón (%) y Total de nutrientes digestibles (TND, %).

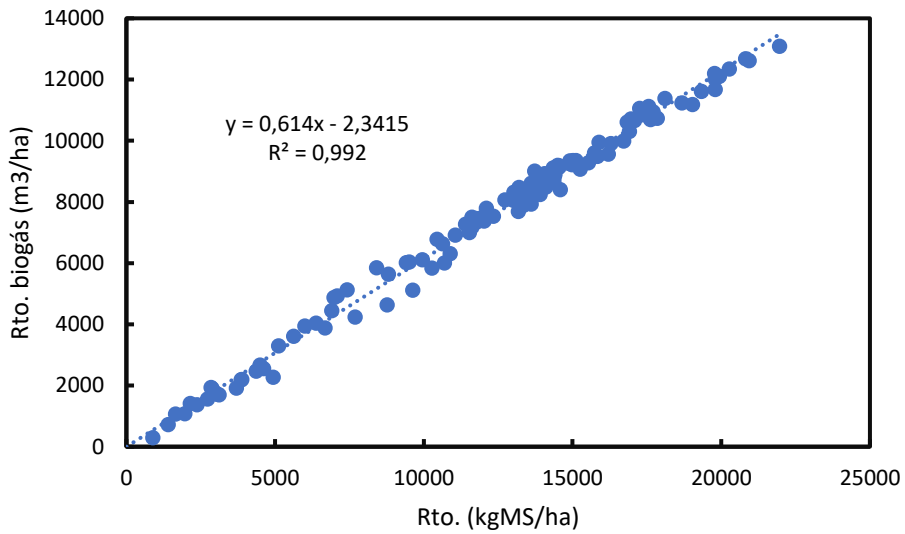


Figura 24. Rendimiento de biomasa (kgMS/ha) y Rendimiento de biogás (m³/ha).

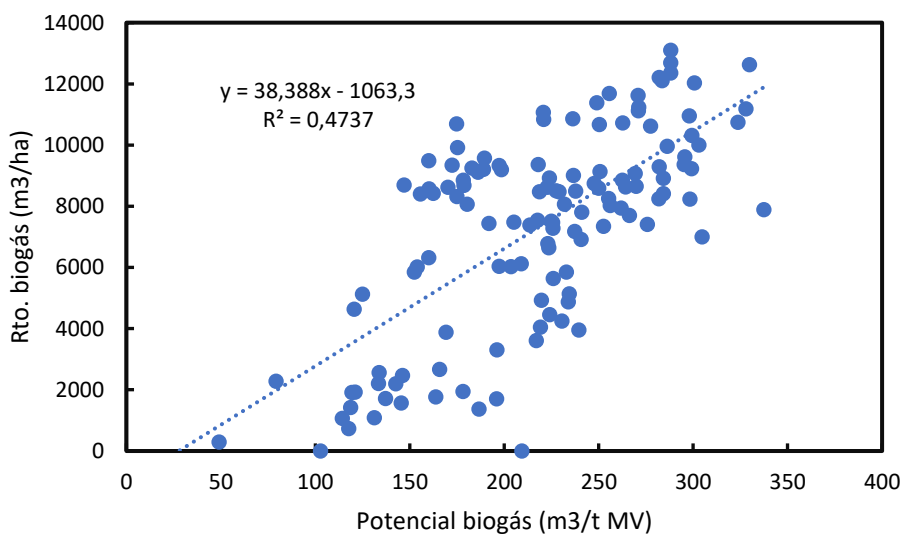


Figura 25. Potencial de biogás (m³/t MV) y Rendimiento de biogás (m³/ha).

Resumen

Pastura perenne:

La producción promedio de biogás de la pastura perenne en el período analizado de 11 meses fue de 12.000 m³/ha, superando el promedio de los maíces para silaje en ambientes de calidad intermedia. La pastura perenne podría compararse con un doble cultivo en términos de producción de biogás por superficie y tiempo.

Maíz:

El maíz fue el cultivo que presentó la mayor producción de biogás por hectárea en ambientes de alto potencial.

Cultivos invernales:

Dentro de los cultivos invernales, la consociación de vicia y centeno se destacó por su alto potencial de biogás por tonelada de materia verde.

Sorgos:

Los sorgos de doble propósito y graníferos tuvieron mayores potenciales de biogás por tonelada de materia verde que los sorgos forrajeros, posiblemente debido a su mayor contenido de grano y materia seca al momento del muestreo.

Ensayos de Nitrógeno x Densidad en maíz para silaje:

No se observó una respuesta clara al agregado de nitrógeno en los ensayos de NxD en maíz.

La densidad óptima de siembra estuvo entre 65.000 y 70.000 semillas por hectárea en ambos sitios evaluados.

Uso agronómico de digestato:

Es necesario continuar los ensayos a mediano y largo plazo para evaluar el impacto del uso agronómico de digestato en los rendimientos de biomasa, potenciales de biogás y variables de suelo.

El análisis económico del uso de digestato consideró solamente el aporte de N, P y S, pero no contempló otros beneficios potenciales como el aporte de carbono al suelo y mejoras en la calidad y salud del mismo.

Rendimiento de biogás:

Los principales parámetros de calidad que influyeron en el potencial de biogás fueron el contenido de materia seca, el total de nutrientes digestibles y el rendimiento por unidad de superficie.

Conclusiones generales del proyecto

En general, estos ensayos brindan información valiosa sobre el desempeño de diversos cultivos y prácticas agronómicas en relación a la producción de biogás, destacando el potencial de la pastura perenne, el maíz y algunas combinaciones de cultivos invernales.

En las regiones con aptitud agrícola para el cultivo de maíz, este sería la mejor opción para maximizar la producción de biogás por superficie. En zonas marginales o con restricciones hídricas, los sorgos dulces/azucarados o el maíz de guinea podrían ser mejores alternativas que el maíz tradicional para producción de biogás. Las pasturas perennes consociadas representan una muy buena opción en áreas ganaderas, aprovechando su productividad sostenida y complementariedad con la actividad principal.

Respecto al manejo de cultivos, la densidad de siembra óptima para maximizar la producción de biogás en maíz estuvo en el rango de 65.000-70.000 semillas/ha. En sorgos, los materiales de doble propósito (graníferos azucarados) fueron más convenientes que los forrajeros puros. Las consociaciones de cultivos invernales como vicia+centeno mostraron excelentes potenciales, pudiendo aprovechar un doble cultivo anual.

El uso de digestatos como fertilizante puede generar ahorros económicos por el aporte de nutrientes, pero se requieren evaluaciones de mayor plazo para determinar otros impactos positivos en suelos y rendimientos.

Más allá de los rendimientos, la calidad de la biomasa en términos de materia seca y concentración de carbohidratos solubles/almidón fue determinante de los potenciales de biogás.

En resumen, las estrategias de cultivos y manejos a adoptar dependerán de la zona agroecológica, siendo el maíz la mejor opción en ambientes óptimos, pero con alternativas promisorias como sorgos dulces, pasturas y cultivos invernales en situaciones contrastantes. La calidad de biomasa será clave para complementar los altos rendimientos en la producción final de biogás.

CREA – Proyecto Bioenergía

Área de Lechería

Informe elaborado por: Ing. Agr. Gonzalo Berhongaray e Ing. Agr. Cecilia Nasser Marzo.

Técnicos responsables en los campos: Lic. Alberto Helbusch, Ing. Agr. Maria Florencia Blasco e Ing. Agr. Vicente Reynoso

Empresas CREA: Tigonbu S.A.; María Elena S.A.; ENRECO S.A.