



**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO**

**PASTIZALES NATURALES COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE**

**EMILIANO JOZAMI**

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS**

**DIRECTORA: SUSANA R. FELDMAN  
CO-DIRECTORA: BÁRBARA M. CIVIT**

**2023**

## **TÍTULO DEL TRABAJO DE TESIS**

**Emiliano Jozami**

**Ing. Agrónomo – Universidad Nacional de Rosario**

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Doctor en Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título en ésta u otra Universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en la Facultad de Ciencias Agrarias (UNR), durante el período comprendido entre abril de 2017 y abril de 2022, bajo la dirección de la Dra. Susana R. Feldman y la codirección de la Dra. Bárbara M. Civit.



Nombre y firma del Doctorando: Emiliano Jozami



Nombre y firma de la Directora: Susana R. Feldman



Nombre y firma de la Co – Directora: Bárbara M. Civit

## AGRADECIMIENTOS

Esta Tesis no podría haberse realizado sin el apoyo incondicional de mi familia. Quiero especialmente agradecer a mi esposa e hijos por saber comprender mis períodos de ausencia por asuntos laborales, tantos los inherentes a esta Tesis como a otras actividades académicas y profesionales en las que me involucro cotidianamente. Gracias por ser mi sostén permanente.

A mis padres por su apoyo permanente desde los albores de mi afinidad por la Agronomía y a mis hermanos por estar siempre presentes incluso a la distancia.

A mi directora, Susana Feldman, por saber guiarme y responder a mis inquietudes desde los inicios de mi andar en este recorrido académico. Ha sido un privilegio poder trabajar tantos años contigo. A mi co-directora, Bárbara Civit por saber orientarme en una disciplina tan compleja como es el análisis de ciclo de vida. A Pablo Arena, Fernando Mele y Roxana Piastrellini les agradezco por responder a mis consultas en la temática, las cuales no han sido ni pocas ni breves. A Fernando también en especial por su revisión tan detallada de este manuscrito.

A Néstor di Leo por su enorme colaboración tanto para coordinar los viajes a los espartillares como en la discusión y planeamiento del abordaje de la estimación de biomasa del espartillo, y por evacuar dudas sobre esta temática que “maneja” con destreza.

A Ivana Barbona por su ayuda permanente para la realización del análisis estadístico. Fueron muchas reuniones por *meet* incluso en días no laborales y el procesamiento fue realmente exhaustivo.

A mis compañeras de la Cátedra de Climatología, Alejandra Coronel, Verónica Anibalini, María José Dickie y Julia Gastaud, por cubrirme durante este año para permitirme culminar con el trabajo de redacción del manuscrito de Tesis.

Al equipo de la Cátedra de Biología donde di mis primeros pasos de docencia e investigación.

A las diversas personas del sector privado que me han ayudado: Gustavo Peyronel, productor con espartillares quien nos facilitó su campo y sus herramientas para obtener los rollos necesarios para enviar a la planta del INTI en Tucumán. A Claudio Dunan de Bioceres por su apoyo para obtener la biomasa y lograr transportarla para su posterior procesamiento y

por facilitarme el informe técnico de la gasificación de la biomasa realizado por parte de Savini para Bioceres.

A José Luis Martinelli por acercarme su opinión desinteresada como profesional referente de la cosecha y recolección de forraje. Sus opiniones fueron muy consideradas a la hora de cosechar esta especie tan difícil de procesar. A Diego Savini por facilitarnos la posibilidad de realizar la gasificación en su planta piloto. A los productores que nos facilitaron sus instalaciones, Patricia Garrone, Eduardo Bulacio y a la Fundación Federico Wildermuth.

A referentes del sector académico que han colaborado incluso sin conocerme presencialmente: Melisa Bertero y Ulises Serdrán, con quienes hemos podido avanzar en publicaciones trabajando en equipo a la distancia.

A la gran cantidad de estudiantes que colaboraron tanto en los viajes para cosechar biomasa como en las instancias posteriores de procesamiento: Danilo Bravo, Gianfranco Arónica, Daniel Marchese, Gisel Sosa, Eliana Perello, Gian Luca Mogni, Lucas Lachnicht y Nicolas Mulhall.

Al equipo del CIFASIS por compartir su equipamiento para el estudio de los espartillares y por sus aportes en las múltiples reuniones que hemos tenido: Enrique Montero Bulacio, Nicolás Rigalli, Martín Romagnoli y Margarita Portapila.

A la Facultad de Ciencias Agrarias, por darme sin costo alguno, la formación que hoy me permite aspirar al título de Dr. Espero que este trabajo pueda al menos en parte retribuir a esta Casa todos estos años de aprendizaje.

## PUBLICACIONES EN REVISTAS CON REFERATO

**Jozami E**, Mele FD, Piastrellini R, Feldman SR. 2022. Life cycle assessment of bioenergy from lignocellulosic herbaceous biomass: The case study of *Spartina argentinensis*. *Energy* 254:1-11.

**Jozami E**, Porstmann JC, Shocron A, Feldman SR. 2017. Techno-economic Assessment of Biomass Gasification of *Spartina argentinensis*. *Agrociencia-Uruguay*.

Rada Arias E, Bertero M, **Jozami E**, Feldman SR, Falco M, Sedran U. 2020. Pyrolytic conversion of perennial grasses and woody shrubs to energy and chemicals. *SN Applied Sciences* 2.

## PRESENTACIONES A CONGRESOS

**Jozami E**, Civit B, Feldman SR. 2021. Balance energético de la producción de energía eléctrica y térmica renovable de pastizales santafesinos. *XXIII Congreso y XLI Reunión Anual de la Sociedad de Biología de Rosario*, Argentina: SBR. ISSN 2314-1484

**Jozami E**, Mele FD, Piastrellini R, Civit B, Feldman SR. 2021. Análisis de ciclo de vida de la producción de energía a partir de *Spartina argentinensis*". *Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment*, Argentina: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional - edUTecNe. 978-987-4998-77-4.

**Jozami E**, Di leo N, Aronica G, Bravo D, Marchese D, Santos A, Feldman SR. 2020. Estimación de biomasa total de *Spartina argentinensis* parodi usando imágenes espectrales obtenidas desde un dron. *Libro de resúmenes del XXI Congreso y XXXIX Reunión Anual de la Sociedad de Biología de Rosario*, Argentina: SBR. ISSN 2314-1484

**Jozami E**, Piastrellini R, Civit B, Feldman SR. 2018. Potencial de calentamiento global de la producción de electricidad a partir de *Spartina argentinensis*. En *Actas del VII Encuentro Argentino de Ciclo de Vida y VI Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica* ENARCIV 2018, Argentina: INTA Ediciones. 9789878333397.

Piastrellini R, Rodriguez P, **Jozami E**, Feldman SR, Defranceschi A. 2017. Análisis energético de biocombustibles de segunda y tercera generación. casos de estudio: bioetanol de tuna, *syngas* de espartillo, biodiésel de cártamo y biodiésel de microalgas. *Libro del IX Congreso Argentino de Ingeniería Química*, Argentina: Asociación Argentina de Ingenieros Químicos.

**Jozami E**, Piastrellini R, Schein L, Civit B, Feldman SR. 2016. Evaluación del potencial de calentamiento global de la producción de electricidad (vía gasificación) a partir de *Spartina argentinensis*. *Avances y estado de situación en análisis de ciclo de vida y huellas ambientales en la Argentina*, Argentina: INTA ediciones. 9789875218109.

**Jozami E**, Civit B, Feldman SR. 2016. Uso de *Spartina argentinensis* para la obtención de electricidad: balance energético. *XVIII Congreso y XXXVI Reunión Anual de la Sociedad de Biología de Rosario*, Argentina: Sociedad de Biología de Rosario. ISSN 2314-1484

Rada Arias E, Bertero M, **Jozami E**, Feldman SR, Sedran U. 2018. Productos sustitutos de hidrocarburos a partir de biomásas de la región litoral. *IV Reunión Interdisciplinaria de Tecnología y Procesos Químicos*, Argentina: RITEQ. 2018.

**Jozami E**, Rearte M, Porstmann JC, Shocron A, Martínez Pullido G, Civit B, Feldman SR. 2015. Balance energético de la obtención de pellets de *Spartina argentinensis*. *Avances y estado de situación en Análisis De Ciclo De Vida y huellas ambientales en la Argentina*, Argentina: INTA ediciones. 9789875216778.

**Jozami E**, Civit B, Feldman SR. 2014. Consideraciones para la confección de inventarios para el uso de pastizales naturales como fuente de energías renovables". *Avances en análisis de ciclo de vida y huellas ambientales en la Argentina: III Encuentro Argentino de Ciclo de Vida. II Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica. ENARCIV*, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.

Feldman SR, **Jozami E**, Shocron A, Porstmann JC. 2013. Producción de pellets de *Spartina argentinensis* como fuente de energía renovable". *VII Jornadas de Ciencia y Tecnología*, Argentina: UNR editora.

Sosa LL, Castagnani L, Formidabile M, **Jozami E**, Feldman SR. 2013. Producción potencial de bioetanol a partir de *Panicum prionitis* Ness. y *Spartina argentinensis* Parodi". *XV Congreso y XXXIII Reunión Anual de la Sociedad de Biología de Rosario*, Argentina: Sociedad de Biología de Rosario. ISSN 2314-1484

Castagnani L, Sosa LL, **Jozami E**, Feldman SR. 2013. Caracterización de biomasa lignocelulósica de especies de pastizal para su aprovechamiento como fuentes de energía". *VI Congreso Nacional, III Congreso del Mercosur, II Jornada Técnica de Productores Asoc. Arg. Manejo de Pastizales Naturales*, Argentina.

## ÍNDICE

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN	6
1.1. Bioenergía. Consumo de energía, combustibles fósiles y calentamiento global	6
1.2. Producción creciente de energías renovables	8
1.3. Biocombustibles: clasificación y políticas de fomento	8
1.4. Proyecciones 2050 y aspectos éticos del uso de alimentos para producir bioenergía	9
1.5. Uso del suelo	11
1.6. Formas de obtención de energía a partir de biomasa	12
1.7. Pastizales naturales - Superficie y quemas	15
1.8. Espartillares de <i>Spartina argentinensis</i>	16
1.9. Fundamentos del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	17
1.10. Estimación de biomasa de pastizales con herramientas de teledetección	19
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	21
MATERIALES Y MÉTODOS	22
2.1. Sistemas bioenergéticos en estudio	22
2.1.1. Flujos de energía (Diagramas de Sankey)	22
2.1.2. Análisis de ciclo de vida (ACV)	23
2.1.2.1. Gasificación para producir bioelectricidad	23
2.1.2.2. Pellets para calefacción domiciliaria	27
2.1.2.3. Bioetanol para el transporte	28
2.2. Estimación de biomasa	30
2.2.1. Zona de trabajo	30
2.2.2. Variables explicativas obtenidas desde el dron	32
2.2.3. Firmas espectrales - Espectrofotómetro	45
2.2.4. Cosecha de biomasa	45
2.2.5. Modelos predictivos de biomasa cuantitativos y cualitativos	46
2.2.6. Caracterización ambiental	47
2.2.7. Caracterización de la firma espectral	47
RESULTADOS	48
3.1. Flujos de energía (Diagramas de Sankey)	48
3.2. Evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV)	50
3.2.1. Gasificación para producir bioelectricidad	50
3.2.1.1. Cambio climático (CC)	50
3.2.1.2. Uso de energía	53
3.2.2. Pellets para calefacción residencial	56
3.2.2.1. Cambio climático (CC)	56
3.2.2.2. Uso de energía	58
3.2.3. Bioetanol para el transporte	61
3.2.3.1. Cambio climático (CC)	61
3.2.3.2. Uso de energía	67
3.2.4. Resumen de la EICV	72
3.3. Estimación de biomasa	73
3.3.1. Caracterización ambiental durante la cosecha	73
3.3.2. Modelos predictivos de biomasa cuantitativos y cualitativos	75
3.3.3. Caracterización de la firma espectral	79

3.3.3.1.	Efecto estacional	79
3.3.3.2.	Efecto del grado de senescencia	80
3.3.3.3.	Firmas espectrales en función de la cantidad de biomasa	81
<b>DISCUSIÓN</b>		<b>82</b>
4.1.	Comparación entre los EB y los EA en base al estado del arte	82
4.2.	Análisis de Ciclo de Vida	84
4.2.1.	Gasificación para producir bioelectricidad	86
4.2.2.	Pellets para calefacción residencial	87
4.2.3.	Bioetanol para el transporte	89
4.3.	Estimación de biomasa	90
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>94</b>
Anexo I		104
Anexo II		105
Anexo III		106
Anexo IV		107
Anexo V		112

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Distribución de la energía primaria global por combustible en (a) 1973 y (b) 2019, adaptado de IEA (2021). (Otras fuentes renovables incluye energía geotérmica, solar, eólica, mareomotriz y calor entre otras) __	6
Figura 2: Crecimiento de las emisiones globales de CO <sub>2</sub> eq por sector (Adaptado de Climate Watch, 2022) ____	7
Figura 3: Contribución de cada sector a las emisiones de GEI globales (Adaptado de Climate Watch, 2022) ____	7
Figura 4: Crecimiento estimado entre 2009 y 2019 de las energías renovables “modernas” como proporción del total de energía final consumida (adaptado de REN21, 2021). _____	8
Figura 5: Cambio directo e indirecto en el uso del suelo asociados a la producción de biocombustibles. Adaptado de Thornley y Adams, (2017). _____	11
Figura 6: Formación de polímero de celulosa por uniones β-1,4 glucosídicas entre monómeros de glucosa. __	13
Figura 7: Modelo general de las distintas alternativas de obtención de energía a partir de materiales lignocelulósicos _____	14
Figura 8: Límites del sistema EBe90 y su contraste con el actual sistema de producción de electricidad y calor industrial basado en energía fósil _____	24
Figura 9: Izquierda: parcela cortada para obtención de rollos. Derecha: Algunos de los rollos quedaron en el lote como se puede apreciar en la imagen _____	25
Figura 10: Pellets de <i>S. argentinensis</i> _____	26
Figura 11: Límites del sistema EBc y su contraste con el actual sistema de producción calor residencial basado en energía fósil (EAc) _____	27
Figura 12: Límites del sistema EBt y su contraste con el actual sistema de producción de combustible líquido (Nafta) para el transporte basado en energía fósil _____	29
Figura 13: Parcela de muestreo al oeste del paño (izquierda); Parcelas de muestreo en Wildermuth e imagen del paño y el sector que representaría al área cosechada (derecha). _____	31
Figura 14: Zona de trabajo en el espartillar delimitado por el rectángulo negro (izquierda) y ejemplo de un paño con las tres zonas de muestreo _____	31
Figura 15: Plataforma de vehículo aéreo no tripulado (eBee SQ). _____	32
Figura 16: Espectrofotómetro utilizado _____	45
Figura 17: Muestra procesada donde se observa la biomasa verde a la izquierda y la senescente a la derecha _	46
Figura 18: Flujo de energía del escenario EBc _____	48
Figura 19: Flujo de energía de la gasificación en el escenario EBe90 _____	48
Figura 20: Flujo de energía del escenario EBt con datos de Luo et al. (2009) _____	49
Figura 21: Diagrama de redes adaptado de SimaPro de las emisiones de CO <sub>2</sub> eq del mix eléctrico argentino (EAe) para producir 1 MWh de electricidad de medio voltaje _____	50
Figura 22: Diagrama de redes adaptado de SimaPro de las emisiones de CO <sub>2</sub> eq de EBe90 _____	51
Figura 23: Diagrama de redes adaptado de SimaPro de las emisiones de CO <sub>2</sub> eq de EBe50 _____	51
Figura 24: Diagrama de redes adaptado de SimaPro de las emisiones de CO <sub>2</sub> eq de EBe0 _____	52
Figura 25: Resultado de GWP para los tres escenarios bioenergéticos y el actual _____	52
Figura 26: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para la producción de electricidad en la Argentina (UF: 1 MWh inyectado a la red) _____	53
Figura 27: Diagrama de redes adaptado de SimaPro, mostrando la demanda energética acumulada (CED) para EBe90 _____	54
Figura 28: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para EBe50 _____	54

Figura 29: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para EBe0	55
Figura 30: Resultado de demanda energética acumulada (CED) y EROI para todos los EBe y su contraste con el EAe	55
Figura 31: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el GWP para EAc	56
Figura 32: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el GWP para EBc	56
Figura 33: Resultado de GWP para EBc y EAc	57
Figura 34: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para EAc	58
Figura 35: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para EBc	59
Figura 36: Resultado de CED y EROI para EBc y su contraste con el EAe	60
Figura 37: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el potencial de calentamiento global (GWP) para el escenario actual de transporte (EAt)	61
Figura 38: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el potencial de calentamiento global (GWP) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Luo et al. (2009)	62
Figura 39: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el potencial de calentamiento global (GWP) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Luo et al. (2009) considerando autoabastecimiento energético	63
Figura 40: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el potencial de calentamiento global (GWP) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Jungbluth et al. (2007)	64
Figura 41: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el potencial de calentamiento global (GWP) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Kumar y Murthy (2012) (pretratamiento con ácido diluido)	64
Figura 42: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el potencial de calentamiento global (GWP) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Kumar y Murthy (2012) (pretratamiento con álcali)	65
Figura 43: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el potencial de calentamiento global (GWP) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Kumar y Murthy (2012) (pretratamiento con agua caliente)	65
Figura 44: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el potencial de calentamiento global (GWP) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Kumar y Murthy (2012) (pretratamiento con explosión de vapor). UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.	66
Figura 45: Resultado de GWP para EBt en base a diversas fuentes bibliográficas para los datos de biorefinería y EAt	66
Figura 46: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para un escenario actual de transporte basado en nafta (EAt). UF: uso de 1 MJ de combustible líquido	67
Figura 47: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Luo et al. (2009) con autoabastecimiento energético de la biorefinería. UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.	67
Figura 48: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Luo et al. (2009). UF: uso de 1 MJ de combustible líquido	68
Figura 49: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Jungbluth et al. (2007). UF: uso de 1 MJ de combustible líquido	69
Figura 50: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Kumar y Murthy (2012); pretratamiento con ácido diluido. UF: uso de 1 MJ de combustible líquido	70

Figura 51: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Kumar y Murthy (2012); pretratamiento alcalino. UF: uso de 1 MJ de combustible líquido _____	70
Figura 52: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Kumar y Murthy (2012); pretratamiento con agua caliente. UF: uso de 1 MJ de combustible líquido _____	71
Figura 53: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Kumar y Murthy (2012); pretratamiento con explosión de vapor. UF: uso de 1 MJ de combustible líquido _____	71
Figura 54: Resultado de CED y EROI para EBt y su contraste con el EAt _____	72
Figura 55: Almacenaje de agua en el suelo en función de la serie histórica de El Trébol (1991 hasta 2020). Las flechas verdes indican los momentos de cosecha en Wildermuth y las azules en el establecimiento privado. Los puntos azules indican la situación de cada año facilitando la comparación con la serie histórica. _____	73
Figura 56: Precipitaciones en función de la serie histórica de El Trébol (1991 hasta 2020). Las flechas verdes indican los momentos de cosecha en Wildermuth y las azules en el establecimiento privado. Los puntos azules indican la situación de cada año facilitando la comparación con la serie histórica. _____	74
Figura 57: Temperaturas máximas en función de la serie histórica de El Trébol (1991 hasta 2020). Las flechas verdes indican los momentos de cosecha en Wildermuth y las azules en el establecimiento privado. Los puntos azules indican la situación de cada año facilitando la comparación con la serie histórica. _____	74
Figura 58: Temperaturas mínimas en función de la serie histórica de El Trébol (1991 hasta 2020). Las flechas verdes indican los momentos de cosecha en Wildermuth y las azules en el establecimiento privado. Los puntos azules indican la situación de cada año facilitando la comparación con la serie histórica. _____	75
Figura 59: Fracciones de biomasa de <i>S. argentinensis</i> para las cinco fechas de cosecha en los dos sitios _____	75
Figura 60: Modelos predictivos de biomasa total, senescente y verde con la inclusión del sitio como variable cualitativa (izquierda) y sin la inclusión del sitio (derecha) _____	77
Figura 61: Resultado del modelo cualitativo corrido en pixels de 8 cm en el que se observan delimitadas en círculos negros las 30 muestras. A la izquierda se pueden apreciar 3 muestras cuya clasificación es 3 (Azul). _	78
Figura 62: Resultado del modelo cuantitativo sin sitio corrido en pixels de 8 cm en el que se observan delimitadas en círculos negros las 30 muestras. A la izquierda se pueden apreciar 3 muestras cuya clasificación es 3 (Azul). _____	79
Figura 63: Firmas espectrales del espartillo en marzo (curva roja y línea negra) y octubre (curva azul y línea verde) _____	80
Figura 64: Firmas espectrales del espartillo separado en tres grupos de 20 muestras cada uno en función del grado de senescencia _____	80
Figura 65: Firmas espectrales del espartillo en función de la cantidad de biomasa (Cada grupo representa 15 muestras en función del ranking de biomasa total) _____	81
Fig 66: adaptación de la figura 7 de (Martín-Gamboa et al., 2020) con datos de esta Tesis incorporando EBc con (círculo verde) y sin (círculo rojo) la quema del pastizal como proceso evitado. Cada corchete es una cita de la revisión bibliográfica del mencionado artículo. _____	89

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Inventario de los procesos de EBe_____	25
Tabla 2: Inventario de los procesos evitados en los EBe_____	26
Tabla 3: Inventario de los procesos considerados en el EBc_____	28
Tabla 4: Inventario de los procesos evitados en EBc _____	28
Tabla 5: Inventario de los procesos considerados en el EBt _____	30
Tabla 6: Procesos evitados en el EBt_____	30
Tabla 7: Bandas e índices espectrales obtenidos del espartillo desde el dron _____	44
Tabla 8: Datos de los muestreos realizados_____	46
Tabla 9: resumen de la EICV para todos los sistemas evaluados. Los datos de escenarios de electricidad están expresados en MJ para facilitar las comparaciones con los demás escenarios. _____	72
Tabla 10: variables empleadas por cada modelo_____	76
Tabla 11: Indicadores de desempeño de los modelos predictivos de biomasa. _____	78

## ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

ACV: análisis de ciclo de vida

CC: cambio climático

CDUS: cambio directo en el uso del suelo

CED (*Cumulative energy demand*): demanda energética acumulada

CHP (*Combined heat and power*): producción combinada de calor y electricidad

CI<sub>green</sub> (*chlorophyll index green*): índice verde de clorofila

CI<sub>re</sub> (*chlorophyll red-edge*): índice de clorofila del borde rojo

CIUS: cambio indirecto en el uso del suelo

CO<sub>2eq</sub>: dióxido de carbono equivalente

COP26: La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático de 2021 fue la 26<sup>a</sup> conferencia de las partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, y se celebró entre el 31 de octubre y el 12 de noviembre en la ciudad de Glasgow (Escocia)

CTEF: consumo total energía final

EAc: Escenario actual de producción de calor residencial en la Argentina (basado en la combustión de gas natural en estufas de tiro balanceado)

E Ae: Escenario actual de producción de electricidad en la Argentina

EAt: Escenario actual de transporte basado en naftas como combustible en la Argentina

EBc: Escenario bioenergético propuesto para producir calor para el sector residencial mediante la combustión de pellets de *Spartina argentinensis* en estufas diseñadas para tal fin

EBe: Escenario bioenergético propuesto para producir electricidad mediante la combustión de gas de síntesis generado a partir de la gasificación de *S. argentinensis*. Se plantean tres subescenarios en función del aprovechamiento *in situ* del calor de cogeneración (EBe0, EBe50 y EBe90 para un aprovechamiento del 0%, 50% y 90% del calor producido, respectivamente)

EBt: Escenario bioenergético propuesto para el transporte vehicular empleando bioetanol de *Spartina argentinensis* como combustible

EICV: evaluación de impacto del ciclo de vida

EJ: Exa Joule o 10<sup>18</sup> Joules

EJ: exajoules (Joules elevado a la 16<sup>a</sup> potencia)

EROI (*energy return on investment*). Tasa de retorno energético

FWHM (Full Width at Half Maximum): Ancho completo a la mitad del valor máximo. Está dada por la distancia entre los puntos de una curva normal en los que la función alcanza la mitad de su valor máximo.

GEI: gases de efecto invernadero

GNDVI (*Green normalized difference vegetation index*): Índice de vegetación de diferencia normalizada Verde

Gr: Banda espectral verde (530-570 nm)

GRVI (*green-red vegetation index*): Índice de vegetación Verde-Rojo

GWP (*global warming potential*): Potencial de calentamiento global

IEA: *International Energy Agency*

IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*): Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

IRENA (*International Renewable Energy Agency*): Agencia Internacional de las Energías Renovables

ISO: (*International Organization for Standardization*): Organización Internacional de Normalización

KJ: KiloJoule o  $10^3$  Joules

KW: Kilowatt o  $10^3$  watts

Meris CI (*medium resolution imaging spectrometer cyanobacteria index*): Espectrómetro de imágenes de resolución media - índice de cianobacterias

Mg: Mega gramo o  $10^6$  gramos

MJ: MegaJoule o  $10^6$  Joules

MWh: Megawatt hora, cantidad de energía entregada durante una hora con una potencia de 1 MWatt (1 MJ por segundo). Equivale a 3,6 GJ o 3600 MJ

NDRE (*normalized difference red edge index*): Índice Normalizado Diferencial de Borde Rojo

NDVI (*normalized difference vegetation index*): Índice de vegetación de diferencia normalizada

NDWI (*normalized difference water index*): Índice normalizado diferencial de agua

NGRDI (*Normalized green red difference index*): Índice de diferencia verde-rojo normalizado

NIR: Banda espectral infrarrojo cercano (770-810 nm)

NRMSE (*normalized root mean squared error*): raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado

OSAVI (*optimized soil adjusted vegetation index*): Índice de Vegetación Ajustado de Suelo optimizado

PCI: Poder calorífico inferior

PSRI (*plant senescence reflectance index*): Índice de reflectancia de senescencia de las plantas

Rd: Banda espectral rojo (640-680 nm)

Re: Banda espectral borde rojo (730-740 nm)

Row *Rest of the World*: Resto del mundo: Un concepto dinámico que existe en la situación en la que tanto un conjunto de datos globales, como uno o más conjuntos de datos no globales, están disponibles para la misma actividad, período de tiempo y escenario macroeconómico.

SR (*simple ratio*): Índice de Relación Simple

TCARI (*transformed chlorophyll absorption reflectance index*): Índice de reflectancia en absorción de clorofila transformada

TKM: Tonelada kilómetro. Es una unidad muy empleada en los inventarios de ACV cuyo valor surge de multiplicar la masa de carga transportada (en toneladas) por la distancia recorrida en km

UF: unidad funcional

## RESUMEN

El calentamiento global tiene origen en las emisiones de gases de efecto invernadero cuyo aporte antrópico ha crecido notablemente desde la revolución industrial. El sector que más aporta a estas emisiones es el energético por ello, a nivel global se están investigando alternativas para reemplazar a los combustibles fósiles por fuentes de energía renovable. En esta Tesis se evalúa un recurso biomásico muy abundante en la provincia de Santa Fe: pastizales naturales (espartillares) de los Bajos Submeridionales en los cuales *Spartina argentinensis* (espartillo) es la especie dominante.

Se han evaluado, mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, tres alternativas para aprovechar bioenergéticamente esta especie sin cambiar el uso actual de suelo: (i) bioelectricidad inyectada a la red (Unidad funcional: inyectar 1 MWh de electricidad a la red), (ii) calor domiciliario (Unidad funcional: entregar 1 MJ de calor útil para calefacción en el sector residencial) y (iii) bioetanol (Unidad funcional: producir 1 MJ de combustible líquido para ser utilizado en el transporte vehicular). Los tres escenarios fueron contrastados con los escenarios actuales basados mayoritariamente sobre energía fósil.

Se consideraron dos categorías de impacto: (i) cambio climático mediante el indicador *Global Warming Potential* (GWP, potencial de calentamiento global) con un horizonte de 100 años, y (ii) uso de energía evaluando dos indicadores: *Cumulative Energy Demand* (CDE, demanda de energía acumulada) y *Energy Return on investment* (EROI, tasa de retorno de la inversión energética). En todos los escenarios bioenergéticos, la quema del pastizal natural, es reemplazada por la cosecha de un 50% de la biomasa evitando emitir a la atmósfera una gran cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) a causa de estas quemadas.

La bondad ambiental de la bioelectricidad fue muy dependiente de la eficiencia en el aprovechamiento del calor de cogeneración; no obstante, incluso el escenario más pesimista tuvo un GWP negativo (es decir que el sistema disminuye las concentraciones de CO<sub>2</sub>eq de la atmósfera) y presentó un EROI de 6: por cada unidad energética requerida por el sistema producto, se producen 6 unidades. Ambos indicadores mejoraron notablemente en los casos de mayor aprovechamiento del calor de cogeneración.

El resultado fue también muy favorable en el escenario bioenergético de calefacción residencial con pellets al compararlo con el sistema actual basado sobre la calefacción con gas

natural. Por cada MJ de calor útil entregado, se sustraen de la atmósfera 5,12 gramos de CO<sub>2</sub>eq y, para obtener esta energía, solo se emplean en el sistema 0,27 MJ resultando el EROI equivalente a 3,5.

El caso de producción de bioetanol fue muy dependiente de los datos considerados para la etapa industrial, porque hay una variación importante en la bibliografía. Un factor fundamental para obtener menores impactos ambientales es que los requerimientos energéticos de la planta sean abastecidos por los subproductos de la producción de bioetanol: fundamentalmente lignina y residuos sólidos de la hidrólisis. En el caso mencionado, la producción de bioetanol de espartillo sería carbono negativa: 50 gramos de CO<sub>2</sub>eq por cada MJ de biocombustible. Lo mismo sucede con la categoría de impacto “uso de energía”: los valores calculados en esta Tesis resultan favorables (EROI superiores a 1) cuando se comparan con el sistema actual y podrían mejorar aún más si se autoabastecen los requerimientos energéticos de la planta industrial.

En caso de adoptarse alguno de los escenarios bioenergéticos propuestos, resultará necesario identificar áreas con mayor disponibilidad de biomasa puesto que un bajo rendimiento de cosecha elevará proporcionalmente todas las cargas ambientales de la etapa de campo. Por ello, se evaluó la posibilidad de predecir la disponibilidad de biomasa de *S. argentinensis* mediante cámaras espectrales montadas en un dron, con el objetivo de poder obtener un modelo predictivo extrapolable a una mayor escala mediante imágenes satelitales. El modelo obtenido para estimar la biomasa total del espartillo permitió explicar el 62% de su variabilidad. Las fracciones de la biomasa verde y senescente pudieron ser predichas con mayor precisión, presentando un R<sup>2</sup> de 66% para cada una de ellas. La raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE por sus siglas en inglés: *Normalized root mean square error*) fue de 24%, 30% y 27% para biomasa total, senescente y verde, respectivamente.

Palabras clave: Pastizales naturales; Sustentabilidad; Teledetección; Biomasa; Bioenergía; Análisis de ciclo de vida.

## RANGELANDS AS A SOURCE OF RENEWABLE ENERGY

### ABSTRACT

Global warming originates from greenhouse gas emissions whose anthropic contribution has grown significantly since the industrial revolution. The Energy sector is the one that contributes the most to these emissions, therefore, alternatives are being investigated globally to replace fossil fuels with renewable energy sources. In this Thesis, an abundant biomass resource within the province of Santa Fe is evaluated: native grasslands (espartillares) of the Bajos Submeridionales in which *Spartina argentinensis* (espartillo) is the dominant species.

Using the Life Cycle Analysis methodology, three alternatives have been evaluated to obtain bioenergy from this species without changing the current land use: (i) bioelectricity injected into the grid (Functional unit: inject 1 MWh of electricity into the grid), (ii) residential heating (Functional unit: deliver 1 MJ of useful heat for heating into the residential sector) and (iii) bioethanol (Functional unit: produce 1 MJ of liquid fuel to be used in vehicular transport). The three scenarios were contrasted with the current scenarios based mostly on fossil energy.

Two impact categories were considered: (i) climate change through the Global Warming Potential (GWP) indicator with a horizon of 100 years, and (ii) energy use evaluating two indicators: Cumulative Energy Demand (CDE) and Energy Return on investment (EROI). In all bioenergy scenarios, the burning of native grassland is replaced by the harvest of 50% of the biomass, avoiding the emission of a large amount of greenhouse gases (GHG) into the atmosphere due to these burnings.

The environmental goodness of bioelectricity was highly dependent on the efficiency in the use of cogeneration heat; however, even the most pessimistic scenario had a negative GWP (that is, the system decreases CO<sub>2eq</sub> concentrations in the atmosphere) and presented an EROI of 6: for each energy unit required by the product system, 6 units are produced. Both indicators improved notably in the cases of greater use of cogeneration heat.

The result was also very favourable in the bioenergy scenario of residential heating with pellets when compared to the current system based on heating with natural gas. For each MJ of useful heat delivered, 5.12 grams of CO<sub>2eq</sub> are subtracted from the atmosphere and, to obtain this energy, only 0.27 MJ are used in the system, resulting in an EROI equivalent to 3.5.

The case of bioethanol production was highly dependent on the data considered for the industrial stage, because there is an important variation in the bibliography. A fundamental factor to obtain lower environmental impacts is that the energy requirements of the plant are supplied by the by-products of bioethanol production: mainly lignin and solid residues from hydrolysis. In the aforementioned case, the production of bioethanol from *S. argentinensis* would be carbon negative: 50 grams of CO<sub>2eq</sub> for each MJ of biofuel. The same happens with the impact category "energy use": the values calculated in this Thesis are favourable (EROI greater than 1) when compared with the current system and could improve even more if the energy requirements of the industrial plant are self-sufficient.

In case any of the proposed bioenergy scenarios are adopted, it will be necessary to identify areas with greater biomass availability since a low harvest yield will proportionally increase all the environmental loads of the field stage. For this reason, the possibility of predicting the availability of *S. argentinensis* biomass using spectral cameras mounted on a drone was evaluated, with the aim of being able to obtain a predictive model that can be extrapolated to a larger scale using satellite images. The model obtained to estimate the total biomass of *S. argentinensis* allowed to explain 62% of its variability. The green and senescent biomass fractions could be predicted with greater precision, presenting an R<sup>2</sup> of 66% for each of them. Normalized root mean square error (NRMSE) was 24%, 30%, and 27% for total, senescent, and green biomass, respectively.

Keywords: Natural grasslands; Sustainability; remote sensing; biomass; Bioenergy; Life cycle analysis.

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Bioenergía. Consumo de energía, combustibles fósiles y calentamiento global

La demanda global de energía se ha acrecentado notablemente desde mediados del siglo XIX, a raíz de la Revolución Industrial, por el creciente consumo de combustibles fósiles, fundamentalmente petróleo, carbón y gas natural. La figura 1, muestra que el suministro total de energía primaria pasó de 254 EJ en 1973 a 606 EJ en 2019 con una mejora relativa en la contribución de las energías renovables que pasaron del 13% al 19,1% del total (IEA, 2017). A pesar de estas mejoras en términos relativos, la energía fósil ha aumentado desde 221 EJ en 1973 a 491 EJ en 2019 en términos absolutos. Esto ha traído como consecuencia impactos ambientales negativos a nivel global, fundamentalmente relacionados con el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), principales responsables del calentamiento global (IPCC (institution/organization), 2014).

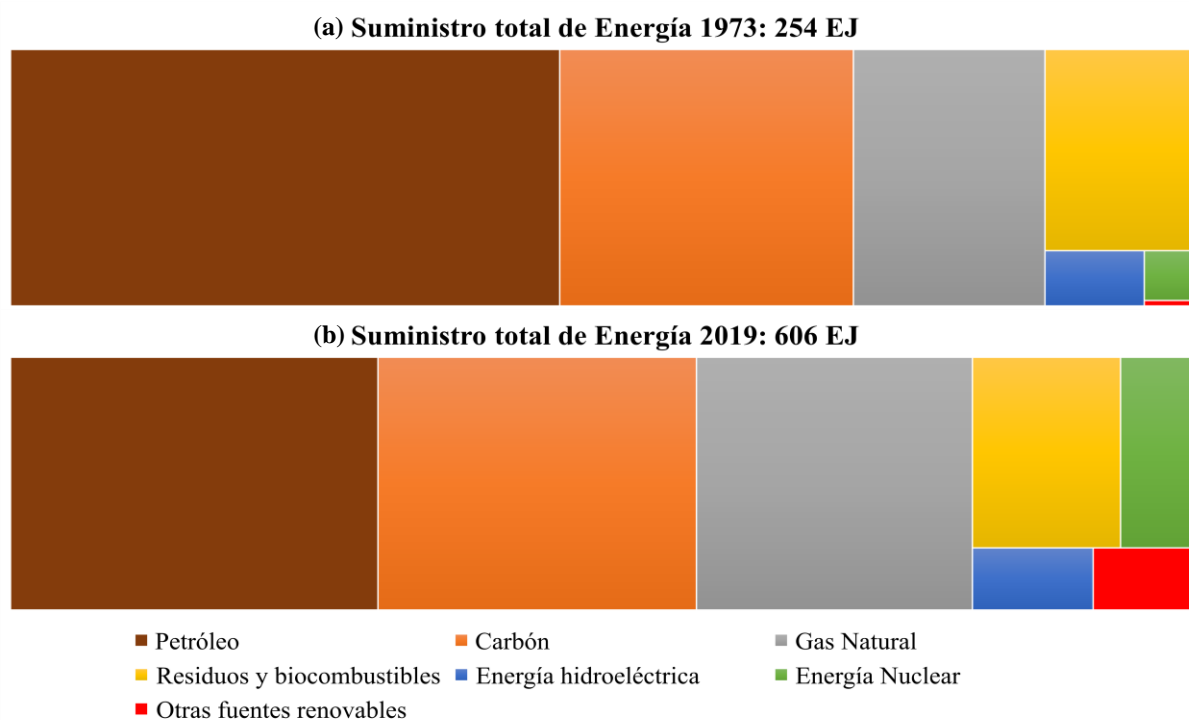


Figura 1: Distribución de la energía primaria global por combustible en (a) 1973 y (b) 2019, adaptado de IEA (2021). (Otras fuentes renovables incluye energía geotérmica, solar, eólica, mareomotriz y calor entre otras)

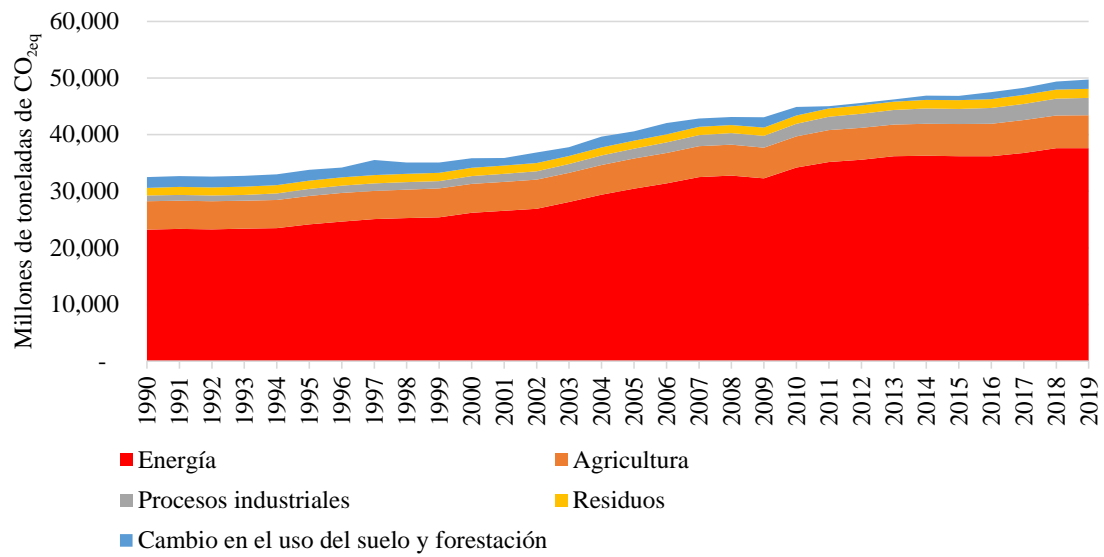


Figura 2: Crecimiento de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>eq por sector (Adaptado de Climate Watch, 2022)

El sector energético en su conjunto (electricidad, calor, transporte, etc.) es responsable de dos tercios de las emisiones de GEI (IRENA, 2019). La figura 2 muestra el crecimiento en las emisiones de CO<sub>2</sub>eq en las últimas décadas desglosado por sector. Puede observarse el rol preponderante del sector energético en esas emisiones. No solo es el sector que más aporta a las emisiones, sino que es el principal responsable de su crecimiento en las últimas décadas.

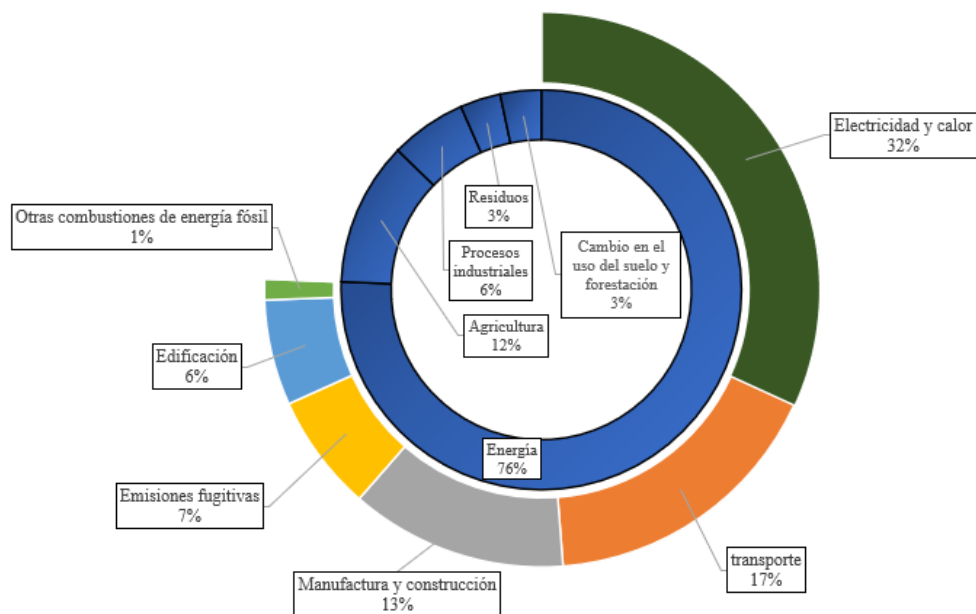


Figura 3: Contribución de cada sector a las emisiones de GEI globales (Adaptado de Climate Watch, 2022)

## 1.2. Producción creciente de energías renovables

A raíz de las políticas de fomento, entre 2007 y 2016, la producción mundial de bioetanol (el biocombustible de mayor producción) se ha duplicado, pasando de 60 a 120 mil millones de L anuales y ha alcanzado un valor máximo de 131 mil millones de L en 2019 (US Department of Energy, 2021). El biodiésel, tuvo un incremento en su producción mundial unos años después en comparación con el bioetanol, pasando de 22,5 mil millones de L en 2010 a 47 mil millones en 2019 (REN21, 2021). Debido al aumento en la demanda mundial de energía, si bien el consumo de combustibles fósiles se mantiene en el orden del 80% del total de la misma, en términos absolutos, su consumo ha aumentado 19% entre 2009 y 2019 (Fig. 4). Del total de aumento en la energía final consumida a nivel global en dicho período, el 25% corresponde a energías renovables modernas (biocombustibles para el transporte, hidroeléctrica, solar, eólica, biomásica, etc.) (REN21, 2021).

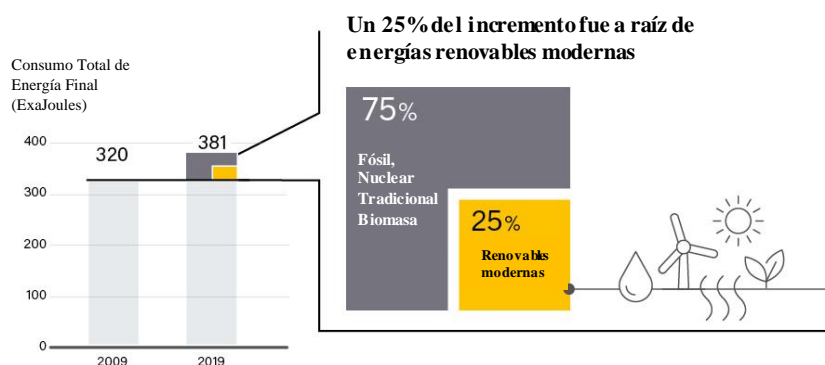


Figura 4: Crecimiento estimado entre 2009 y 2019 de las energías renovables “modernas” como proporción del total de energía final consumida (adaptado de REN21, 2021).

## 1.3. Biocombustibles: clasificación y políticas de fomento

Los biocombustibles cuya materia prima son fuentes alimenticias, son denominados biocombustibles de primera generación. Existe una gran cantidad de trabajos de investigación que demuestran cómo su mayor demanda actúa como factor alcista sobre los precios de los alimentos (Bahel et al., 2013; Lucotte, 2016; Paris, 2018). Incluso algunos trabajos recientes reportan efectos bidireccionales, es decir que los precios de los *commodities* (productos indiferenciados con alto volumen de comercialización en el mercado internacional), podrían afectar a su vez a los precios del petróleo (Wei Su et al., 2019; Sun et al., 2021).

En este contexto, hay un creciente interés en los biocombustibles denominados de segunda generación puesto que, a diferencia de los de primera generación, son producidos a partir de biomasa que no puede ser utilizada para consumo humano. Algunos ejemplos son: residuos de cosecha, cultivos bioenergéticos herbáceos o leñosos, residuos sólidos urbanos, residuos de sistemas intensivos de producción animal, etc. Dentro de los biocombustibles de segunda generación, se les ha prestado particular atención a los lignocelulósicos considerando que la lignocelulosa es el compuesto orgánico más abundante del planeta (Sabbadin et al., 2018).

Más recientemente han aparecido trabajos evaluando combustibles denominados de tercera generación a partir de algas y de cuarta generación a partir de microorganismos genéticamente modificados (tanto algas como bacterias). No obstante, en la actualidad solo hay producción comercial de biocombustibles de primera y segunda generación (Abdullah et al., 2019; Moravvej et al., 2019).

En pos de encontrar soluciones a la problemática del calentamiento global, se han creado políticas de fomento a la producción de biocombustibles en distintos países a principio del siglo actual, buscando propender en simultáneo a la seguridad energética y a la mitigación al cambio climático (CC). Estas políticas incluyen cortes obligatorios de combustibles fósiles con etanol y biodiésel, leyes donde se plantean objetivos de la fracción de energía nacional a cubrir con fuentes renovables, subsidios a la producción de energía eléctrica renovable, etc. (REN21, 2021; Coelho et al., 2022).

En la misma línea, se han firmado en 2021 compromisos de varios países (Argentina entre ellos) en el marco de la conferencia de partes (COP26) llevada a cabo en Glasgow, en los cuales se plantea como objetivo para 2050 alcanzar el valor cero de emisiones netas de carbono (definido también como neutralidad de carbono). La neutralidad de carbono implicaría emitir en un año, la cantidad de carbono que el planeta en su conjunto es capaz de absorber de la atmósfera en ese lapso de tiempo. Si bien estos objetivos resultan necesarios para concientizar a la población y comprometer a los decisores políticos, las tendencias crecientes de las emisiones de CO<sub>2</sub>eq de las últimas décadas parecieran difíciles de revertir para el año 2050.

#### **1.4. Proyecciones 2050 y aspectos éticos del uso de alimentos para producir bioenergía**

Como muestra la figura 4, el consumo total energía final (CTEF) a nivel global en 2019 se ubicó en torno a los 381 EJ (REN21, 2021) representando las energías renovables casi un 20%

de esa cifra. Se estima que la demanda de energía primaria ascenderá a 800 EJ para 2050 y considerando que el CTEF representa en promedio el 63% de la energía primaria, es de esperar que se encuentre en torno a 500 EJ para ese año (Moriarty y Honnery, 2012; Ahmad y Zhang, 2020; United Nations, 2021).

En una revisión bibliográfica, Popp et al. (2014) reportaron que para el año 2050 el potencial de obtención de bioenergía primaria oscilará entre 50 y 1500 EJ. Basado en este amplio rango, los autores proponen 200 a 500 EJ como valor alcanzable para 2050 en condiciones de producción sostenible (sin considerar la biomasa acuática por su estado de incipiente desarrollo). Incluso el escenario más pesimista (200 EJ) resulta auspicioso dado que el 25% de la demanda global de energía primaria estaría cubierta a partir de la bioenergía; en el escenario optimista (500 EJ) se superaría el 60%.

Considerando que actualmente el 19,1% de la demanda de energía primaria global es cubierta por fuentes renovables, incluso las proyecciones pesimistas plantean una mejoría en términos relativos. No obstante, para mantener 491 EJ (ver sección 1.1) de energía derivada de fuentes fósiles en un escenario 2050 con 800 EJ de energía primaria global, deberían producirse al menos 310 EJ de bioenergía. En este escenario, la cantidad de bioenergía producida que supere los 310 EJ sería equivalente a la disminución, en términos absolutos, de la combustión de energía primaria de origen fósil (que es en definitiva la que se precisa disminuir para alcanzar la “neutralidad de carbono”).

Los notables incrementos en la producción de biocombustibles de 1ra generación han generado una gran preocupación debido a que las principales fuentes de biomasa empleadas como materias primas son *commodities* agrícolas como el maíz y la caña de azúcar para el etanol o el aceite de colza y de soja para el biodiésel (Bracco, 2016). Rajagopal et al. (2007) hacen un planteo ético al considerar qué ocurriría, si toda la producción de cultivos de trigo, maíz, sorgo, caña de azúcar, entre otros, se destinara a producir bioetanol: se cubriría menos del 60% de la energía consumida globalmente por el combustible a reemplazar. Esto muestra claramente lo insostenible de plantear que los combustibles de primera generación son una solución para mitigar el cambio climático.

## 1.5. Uso del suelo

Una problemática asociada a algunos de los biocombustibles de primera y segunda generación es la competencia por un recurso escaso de gran relevancia en lo que a calentamiento global y seguridad alimenticia compete: el suelo. Los cultivos bioenergéticos, si bien no son en sí fuentes alimenticias, podrían competir con el suelo agrícola necesario para la producción de alimentos (Albanito et al., 2016). Otra opción poco favorable para la producción de biocombustibles es la intervención de ambientes que actualmente están prestando servicios ecosistémicos valiosos y cuyas prestaciones podrían verse comprometidas, en caso de cambiar su uso del suelo actual por planteos de siembra con fines bioenergéticos (de Andrade Junior et al., 2021).

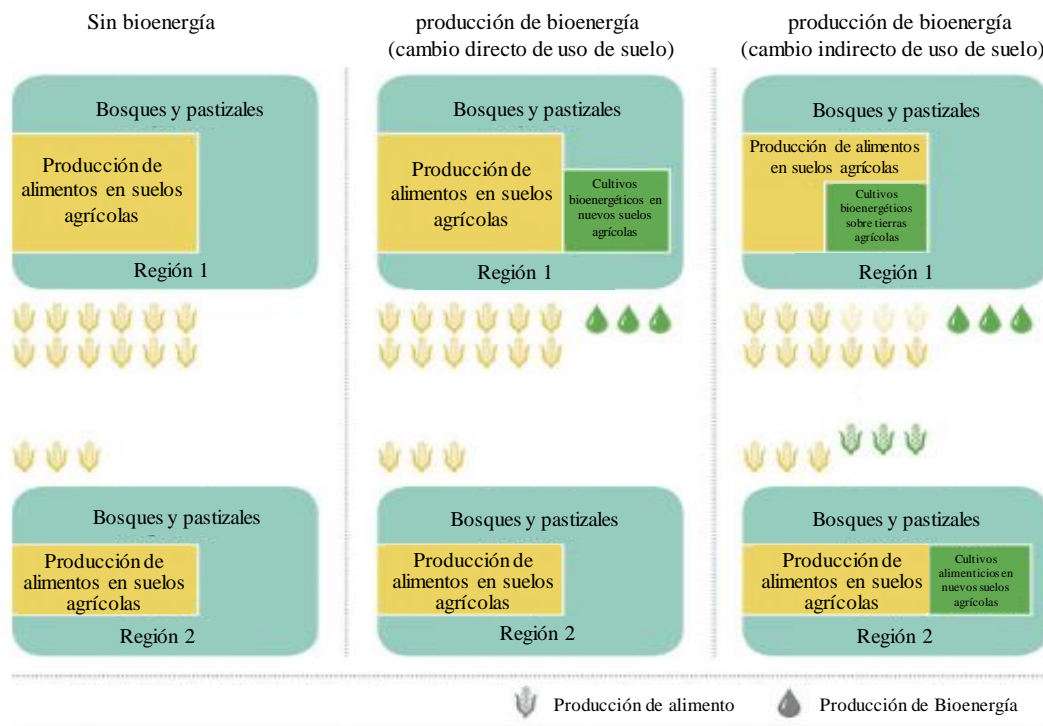


Figura 5: Cambio directo e indirecto en el uso del suelo asociados a la producción de biocombustibles. Adaptado de Thornley y Adams, (2017).

La figura 5 muestra con un sencillo ejemplo, cómo lo que acontece en la “región 1” puede afectar al uso del suelo en la “región 2”. En el escenario actual, la región 1 produce 12 unidades arbitrarias de maíz y la región 2 produce 3. Si se intervienen bosques y/o pastizales de la región 1, se estará realizando un cambio directo en el uso del suelo (CDUS) de un ecosistema actualmente no intervenido por el Hombre, en cuyo caso se liberarían grandes cantidades de carbono a la atmósfera por dicho cambio. Esto permitiría producir 3 unidades arbitrarias de

bioenergía. Si, por el contrario, en la región 1 se cambiase el uso del suelo agrícola para generar bioenergía (disminuyendo en 3 unidades la producción de maíz), esto generaría un alza en el precio del maíz que podría fomentar el cambio en el uso del suelo en los pastizales y bosques de la región 2 para producir estas 3 unidades de maíz que se dejaron de producir en la región 1. En definitiva, habría un cambio indirecto en el uso del suelo (CIUS) por la producción de biocombustibles, que también generaría emisiones de carbono provenientes de los pastizales y bosques de la región 2 incorporados a la agricultura.

Algunos países han puesto como barrera a la importación de biocombustibles que los mismos no pueden derivar de recursos biomásicos sembrados en ambientes de reciente conversión a la agricultura (CDUS), tales como pastizales y bosques. Estas medidas arancelarias no estarían previendo el riesgo del CIUS en otras regiones por la disminución en la disponibilidad de alimentos por producir biocombustibles a partir de tierras agrícolas. La trazabilidad y certificación del origen de la biomasa tendrán en este aspecto un rol fundamental para evitar el intercambio de biocombustibles provenientes de este tipo de ambientes (Mathews, 2008; Partzsch, 2011).

En resumen, la biomasa destinada a producir bioenergía debería en lo posible no provenir de tierras aptas para la producción de alimentos (para evitar el CIUS) ni de ambientes como pastizales o bosques, excepto que su producción no altere su actual uso de suelo. Tal es el caso de los pastizales a evaluar en la presente Tesis, puesto que se plantea cosechar la biomasa del pastizal sin que éste pierda su identidad como tal.

### **1.6. Formas de obtención de energía a partir de biomasa**

Los materiales lignocelulósicos, poseen aproximadamente un 75% de polímeros (Gomez et al., 2008) que permiten obtener productos con fines bioenergéticos como bioetanol, gas de síntesis, bioaceites, etc. Su biomasa está compuesta principalmente por tres fracciones que componen las paredes celulares de las plantas: celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa es un polímero sintetizado por complejos enzimáticos de celulosa sintasa ubicados en la membrana plasmática cuyo producto de síntesis (la celulosa) se ubica hacia afuera de la membrana, en capas. Esta macromolécula, está conformada por monómeros de glucosas con uniones  $\beta$ -1,4 glucosídicas (figura 6) formando un complejo entramado de microfibrillas entrecruzadas con otros heteropolisacáridos (Lampugnani et al., 2018).

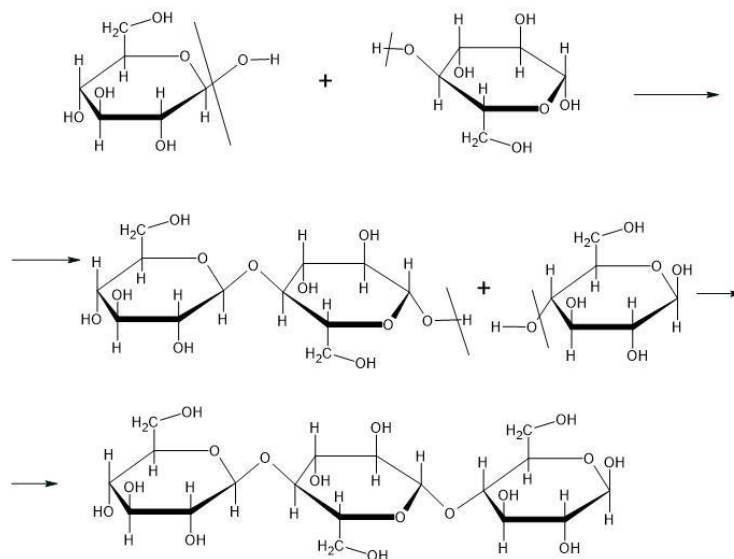


Figura 6: Formación de polímero de celulosa por uniones  $\beta$ -1,4 glucosídicas entre monómeros de glucosa.

La hemicelulosa constituye aproximadamente un tercio de la pared celular y está compuesta por heteromananos, xiloglucano, heteroxilanos y glucano de enlace mixto (Pauly et al., 2013). Cumple un rol fundamental, junto a las pectinas, en la unión de las microfibrillas de celulosa (Lampugnani et al., 2018).

La lignina es un polímero polifenólico irregular sintetizado por polimerización de unidades de tres tipos de fenil propanoides: alcohol coniferílico, alcohol sinapílico y alcohol cumarílico, que determinan estructuras de lignina de tipo guayacilo (G), siringilo (S) y p-hidroxi fenilo (H), respectivamente (Sannigrahi et al., 2010). Este compuesto, si bien está en menor proporción en la pared celular, es determinante en los procesos de obtención de etanol ya que dificulta el acceso a los polisacáridos de celulosa y hemicelulosa por parte de las enzimas hidrolíticas (Larran et al., 2015). Esto conlleva la necesidad de realizar pretratamientos para degradar la lignina y hacer más accesible la matriz lignocelulósica con el fin de aumentar la obtención de azúcares fermentables por hidrólisis de la celulosa y la hemicelulosa (Hendriks y Zeeman, 2009; Gu, 2013; Plácido et al., 2013; Eliana et al., 2014; Gauna et al., 2018).

Los productos derivados de la biomasa lignocelulósica, pueden emplearse para su combustión en vehículos para el transporte, o para producir electricidad y/o calor (figura 7). Los carbohidratos estructurales pueden hidrolizarse liberando monosacáridos, que por fermentación producen etanol, combustible líquido actualmente usado puro o en mezclas para motores de vehículos. Por otro lado, mediante transformaciones termoquímicas como la

gasificación o la pirólisis se pueden obtener gas de síntesis y biocombustible líquido, respectivamente (figura 7).

De estos dos procesos, en esta Tesis se considerará solo la gasificación. Este proceso es una reacción termoquímica que transforma la biomasa en un gas de bajo contenido energético (denominado gas de síntesis o *syngas*) apto para dar funcionamiento a calderas, motores o turbinas. El gas de síntesis se puede utilizar de varias maneras: (i) generación de electricidad con eficiencias de generación de energía del 20-35 %; (ii) producción de calor con una eficiencia de conversión de alrededor del 85 %, y (iii) cogeneración en una planta combinada de calor y electricidad (CHP por su sigla en inglés: *Combined heat and power*) con una eficiencia de energía eléctrica y calor del 15-35 % y 55 %, respectivamente (Basu, 2018; Colantoni et al., 2021).

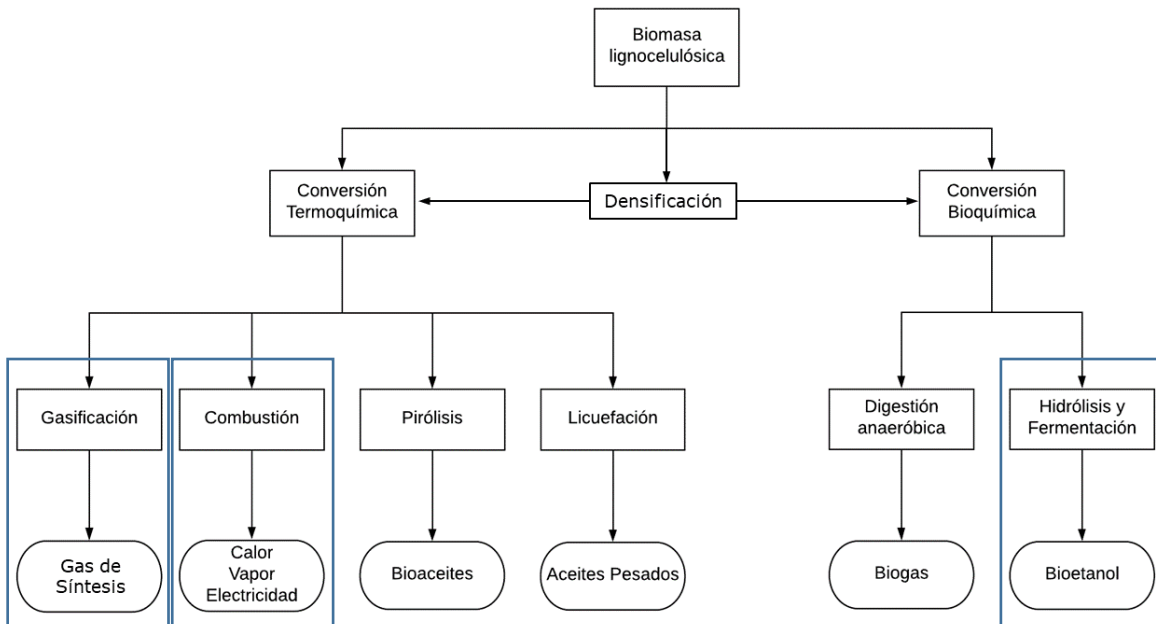


Figura 7: Modelo general de las distintas alternativas de obtención de energía a partir de materiales lignocelulósicos.

La biomasa lignocelulósica presenta baja densidad energética, por lo cual una condición casi excluyente para transportarla grandes distancias, es su densificación para simplificar aspectos logísticos. A su vez, es requisito para poder alimentar la maquinaria encargada de combustionar, gasificar, etc., que la biomasa supere un determinado umbral de densidad. Dos alternativas de densificado son el briqueteado y el pelleteado para obtener briquetas y pellets, respectivamente. Ambos son formas cilíndricas de densificado siendo de mayor tamaño las

briquetas. Estas se utilizan normalmente a modo de leña en calderas. Los pellets, son de menor tamaño y están internacionalmente estandarizados (International Standardization Organization (ISO), 2014) con un diámetro entre 5 y 12 mm y un largo de 10 a 30 mm (Agencia Andaluza de la Energía, accedido en agosto del 2022).

### **1.7. Pastizales naturales - Superficie y quemas**

Los pastizales naturales son uno de los principales tipos de cobertura continental de las zonas libre de hielo y se estima que abarcan globalmente 18.5 millones de km<sup>2</sup> (Godde et al., 2020). En la Argentina el censo nacional agropecuario del 2018 reportó 0.71 millones de km<sup>2</sup> ocupadas por pastizales (INDEC, 2021) mientras que Fernández y Busso (1999), habían indicado que solo el área ocupada por pastizales áridos y semiáridos de la Argentina, abarcaría un área de alrededor de 2 millones de km<sup>2</sup>.

En estos ecosistemas, la actividad ganadera de distintas especies es la principal actividad productiva, en un sistema en el cual el fuego es una práctica de manejo habitual, con un período de recurrencia entre quemas que oscila entre uno y tres años (Levine, 1991). Asimismo, la remoción por las quemas estimula el crecimiento de rebrotes de mayor calidad forrajera tanto en digestibilidad como en contenido de proteínas (Massa et al., 2016). Se facilitan también las tareas de manejo del ganado, que se suele agrupar en las zonas recientemente quemadas.

Si bien los GEI emitidos por las quemas son biogénicos, solo el CO<sub>2</sub> emitido no debe contabilizarse en el balance de carbono, dado que sus emisiones son compensadas con la fijación de carbono acontecida durante el crecimiento de la vegetación quemada. El resto de los GEI producidos, sí deben contabilizarse en evaluaciones de la categoría de impacto “cambio climático” (Harald Aalde et al., 2006). Por otra parte, si la biomasa fuese cosechada en lugar de quemada, podría aprovecharse en alguna de las alternativas para producir bioenergía que serán analizadas más adelante. Es de destacar que el reemplazo del fuego por la cosecha no implicaría modificaciones en el uso del suelo, el cual seguiría siendo un pastizal.

Verón et al., (2012) evaluaron cuánta energía eléctrica podría producirse si se derivase a su producción, la biomasa quemada anualmente encontrando que se combustionan en promedio a escala global 8,3 EJ anualmente. En el caso de la Argentina podría satisfacerse con creces el consumo promedio de electricidad, el cual se encuentra cercano a 0,4 EJ por año.

### 1.8. Espartillares de *Spartina argentinensis*

El espartillo, *Spartina argentinensis* Parodi (= *Sporobolus spartinus* (Trin.) P.M. Peterson & Saarela), es una gramínea nativa perenne, con metabolismo fotosintético C4 y es la especie dominante en una amplia región de alrededor de 30.000 km<sup>2</sup> del centro y norte santafesino, sur de Chaco y este de Santiago del Estero, denominada “Bajos Submeridionales”. Su baja aptitud forrajera, y la dificultad de reemplazarlo por otras especies dadas las características edáficas de este ambiente (halohidromorfismo), determinan que en estas comunidades se practique una ganadería de cría bovina con escasa carga animal y productividad. Las respuestas de los espartillares a disturbios como el fuego y la cosecha han sido estudiadas desde un punto de vista ecológico (Lewis et al., 1990; Feldman y Lewis, 2005).

La hormiga de la especie *Camponotus punctulatus* está adaptada a zonas inundables y por eso coexiste en los espartillares con *S. argentinensis*, formando hormigueros comúnmente denominados tacurúes (Kusnezov, 1951). Se ha propuesto que esta hormiga genera tacurúes de mayor altura en zonas inundables como estrategia adaptativa al anegamiento (Pire et al., 1991; Lewis et al., 2000)

En este contexto, el fuego se concibe como una práctica muy económica que permite estimular los rebrotes de espartillo que son más palatables para el ganado (Luisoni y Bissio, 2014). Una alternativa al fuego, sería la cosecha de la biomasa para lo cual es necesario acondicionar el terreno por la dificultad que imponen los tacurúes al tránsito de la maquinaria. Para poder cosechar la biomasa se requiere roturar los hormigueros con implementos que no corten la biomasa, para luego poder transitar con una cortadora tipo hélice (comúnmente denominada desmalezadora), orear a campo, luego juntar andanas con una hileradora y por último, confeccionar los rollos con una rotoenfardadora.

Sosa et al. (2019), analizaron los impactos del corte y remoción de la biomasa de espartillares sobre el carbono del suelo, las poblaciones de artrópodos y la vegetación. No detectaron cambios significativos entre los tratamientos testigos (sin corte y remoción) y las cosechas cada 6 y 12 meses.

Otros autores han evaluado las posibilidades de obtener bioenergía de segunda generación a partir de pastizales naturales (Jakob et al., 2009; Bourke et al., 2013; Pugesgaard et al., 2014; Ferchaud et al., 2016), e incluso hay trabajos con el espartillo y con especies emparentadas

como *Spartina alterniflora*, *Spartina pectinata* (Dong et al., 2007; Li y Qiu, 2011; Friesen et al., 2015; Guo et al., 2015; Araujo et al., 2019; Sosa et al., 2019).

Dentro de este marco, esta Tesis analiza la producción de biocombustibles a partir de *S. argentinensis*, un recurso biomásico que cae dentro de la clasificación de “segunda generación” y cuyo aprovechamiento no implicaría una modificación en el uso del suelo ni una pérdida de los servicios ecosistémicos del ambiente en cuestión (Sosa et al., 2019). Su aprovechamiento evitaría una externalidad negativa que actualmente ocurre en los ambientes donde esta especie es dominante, debido a que su biomasa es quemada intencionalmente con frecuencia generando emisiones de GEI y material particulado causal de afecciones a las vías respiratorias en las poblaciones aledañas.

### **1.9. Fundamentos del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)**

El ACV es una herramienta de evaluación de impactos de productos, mundialmente reconocida y de creciente utilización en los últimos años, que se ha posicionado como la principal metodología para evaluar objetivamente los impactos ambientales asociados a un sistema-producto (conjunto de procesos unitarios conectados material y energéticamente que realizan una o más funciones definidas). El ACV analiza los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto o una actividad, considerando todas las etapas consecutivas e interrelacionadas desde la adquisición de las materias primas o de su generación a partir de recursos naturales, pasando por el procesamiento y producción del producto, su distribución, uso y por último su disposición final o fin de vida. Cuando todas estas etapas son consideradas, se considera que es un ACV “de la cuna a la tumba” (*from cradle to grave*) aunque dada la inmensidad de procesos intervinientes, debe realizarse algún corte para ignorar algunos de estos procesos con criterios claramente identificados (de Bruijn et al., 2002).

El ACV permite determinar el perfil ambiental de un producto o servicio, proceso o actividad, pero también permite la comparación entre productos o tecnologías que cumplan una misma función, determinándose cuál es la más benigna desde el punto de vista ambiental. En un ACV se consideran todas las fases intermedias como transporte y preparación de materias primas, manufactura, transporte, distribución, uso, etc. La complejidad de dicho análisis requiere de un protocolo al cual deben ajustarse todos los estudios de ACV: las normas fijadas por la Organización Internacional de Normalización (ISO, 2006a; b). La norma ISO 14040 (ISO 14040:2006) describe los principios y marco de trabajo, mientras que los requisitos se describen

en la ISO 14044 (ISO 14044:2006), que además reporta lineamientos para el desarrollo de estos estudios.

Un ACV consta de 4 fases: a) definición de objetivos y alcance en la que se establecen los objetivos del estudio, el alcance y límites del sistema y la unidad funcional (UF: cuantificación de la función de un sistema del producto, servicio o actividad, que se utiliza como unidad de referencia en el estudio de ACV); b) inventario del ciclo de vida (ICV), en la que se identifican y contabilizan todas las entradas y salidas del sistema estudiado; c) evaluación de impactos del ciclo de vida (EICV), en la que los consumos y emisiones se clasifican según categorías de impacto con alcance global o regional y se caracterizan mediante factores de equivalencia, donde se pueden normalizar y ponderar los impactos y d) interpretación, en la que se realiza un juicio de los resultados obtenidos para confeccionar recomendaciones o modificaciones en el estudio planteado. El ACV es un proceso de tipo iterativo en el cual, a partir de la interpretación, puede resultar conveniente la modificación de la definición de objetivos, límites del sistema, inventario, impactos a considerar, etc.

En el ACV se detallan, al mayor grado de precisión y objetividad posible según el objetivo del estudio, las entradas y salidas de masa y energía asociadas a un sistema producto dentro de los límites de un sistema bien definidos. Estas entradas y salidas se reúnen en la fase del inventario. En otra de las etapas del ACV se traducen los resultados del inventario en impactos observables, para las categorías de impacto definidas para el sistema producto analizado, mediante factores de caracterización (Civit, 2009).

Dentro de todos los impactos asociados a la producción de biocombustibles, resulta de crucial interés evaluar la categoría de impacto “cambio climático” (CC) ya que uno de los principales objetivos que se busca mediante el uso de biocombustibles es disminuir las emisiones de GEI asociadas a la combustión de combustibles fósiles. En la categoría de impacto CC se contabilizan las emisiones de gases de efecto invernadero referidas a la UF, la cual debe ser comparable con el uso actual de los combustibles fósiles que se buscan reemplazar. La categoría de impacto “uso de energía” es también muy relevante para los biocombustibles y los indicadores usualmente utilizados son el EROI (*Energy return on investment*, tasa de retorno de la energía invertida) y el CED (*Cumulative energy demand*, demanda energética acumulada). Existen otras categorías de impacto que pueden ser contempladas en un ACV, tales como:

adelgazamiento de la capa de ozono, toxicidad humana, ecotoxicidad acuática, acidificación acuática, acidificación terrestre entre otras.

Como el fin de los combustibles es proveer energía, muchas veces los ACV de los biocombustibles utilizan como UF una unidad de energía (ej: 1 MJ, 1 MWh, etc.), obteniendo como resultado en la categoría de impacto CC un valor de masa de CO<sub>2</sub>eq por unidad de energía. De esta manera se pueden comparar las emisiones asociadas a la producción o uso de 1 MJ de energía a partir de un biocombustible (ej: bioetanol) con las de 1 MJ de energía a partir del combustible fósil que se busca reemplazar (ej: nafta).

### **1.10. Estimación de biomasa de pastizales con herramientas de teledetección**

Para realizar una evaluación de este recurso lignocelulósico, resulta necesario poder conocer la cantidad de biomasa disponible en los espartillares para establecer con facilidad los sectores donde es más factible obtener mayores cantidades de biomasa. Las herramientas de teledetección son de suma importancia dada la gran dimensión del área a estudiar.

Muchos autores han evaluado pastizales de diversas especies intentando establecer correlaciones entre bandas espectrales e índice derivados de éstas, obtenidos a partir de imágenes satelitales y la cantidad de biomasa cuantificada a campo (Todd et al., 1998; Porter et al., 2014; Yang y Guo, 2014). En general las correlaciones obtenidas no son tan elevadas para este tipo de comunidades y el principal motivo es que una parte significativa de la biomasa, se encuentra como biomasa senescente (tejidos necrosados sin actividad fotosintética).

Dado que la misma tiene características espectrales que la hacen menos disímil al suelo, es que resulta más complejo encontrar índices espectrales que sean sensibles a la cantidad de biomasa senescente. Algunos trabajos han evaluado diversos índices espectrales y su correlación con la biomasa de especies emparentadas a *S. argentinensis* o incluso en la misma especie (Hardisky et al., 1984; Gross et al., 1991; González Trilla et al., 2016).

Otra cuestión a tener en cuenta a la hora de evaluar la disponibilidad de biomasa mediante imágenes espectrales, es la resolución espectral de las cámaras montadas sobre los satélites, ya que por lo general tienen un ancho de banda del orden de los 50-100 nanómetros, miden la energía reflejada por la superficie relevada en ese rango de longitud de ondas sin poder discernir qué sucede en una mayor resolución espectral. Para sortear este inconveniente, se puede trabajar con espectrofotómetros de alta resolución espectral a escala de lote a partir de los cuales, se

puede obtener la firma espectral de la superficie de interés. Esto permite poder desarrollar a mayor escala, índices que consideren aquellos sectores del espectro electromagnético que sean más sensibles a la disponibilidad de biomasa del recurso bajo análisis.

## OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Hasta aquí se ha justificado la importancia del estudio de la generación de energía a partir de *S. argentinensis* como una fuente alternativa de bioenergía. A continuación, se exponen las hipótesis de investigación y los objetivos que permitirán su verificación.

Las siguientes hipótesis son testeadas en esta Tesis:

- I. El uso de biocombustibles de segunda generación a partir de *Spartina argentinensis* reduce las emisiones de GEI con respecto al combustible fósil a reemplazar, presentando un balance energético positivo.
- II. La biomasa de *S. argentinensis* puede ser estimada con imágenes espectrales obteniendo un modelo predictivo confiable.

### OBJETIVOS GENERALES

El **objetivo general** para verificar las hipótesis enunciadas es “*contribuir al conocimiento sobre la sustentabilidad ambiental del sector energético mediante el estudio de la potencialidad de Spartina argentinensis como fuente renovable de energía*”. De éste se desprenden los siguientes **objetivos particulares**:

1. Evaluar el potencial de calentamiento global (GWP por su sigla en inglés: *global warming potential*) de la obtención y uso de energía a partir de pastizales naturales utilizando como sistemas modelo a los espartillares de *S. argentinensis* para los siguientes productos bioenergéticos: i) bioetanol; ii) cogeneración mediante sistemas de gasificación; y iii) combustión domiciliaria para producir calor.
2. Estimar la demanda de energía para los productos bioenergéticos del objetivo anterior (CED por su expresión en inglés: *cumulative energy demand*) y la tasa de retorno energético (EROI por su sigla en inglés: *energy return on investment*).
3. Cuantificar y estimar mediante herramientas de teledetección la disponibilidad de biomasa de los pastizales bajo estudio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo presenta cómo se organizó la investigación para alcanzar los objetivos propuestos y demostrar las hipótesis enunciadas.

### 2.1. Sistemas bioenergéticos en estudio

Se contrastaron los impactos generados a partir de la producción de bioenergía en escenarios bioenergéticos (EB), con los que se generan a partir de la energía fósil en el escenario actual (EA). Se analizaron tres sistemas productos, (i) bioelectricidad inyectada a la red (EBe), (ii) calor domiciliario (EBc) y (iii) bioetanol para el transporte (EBt), con fines comparativos.

Las primeras dos fases del ACV (i- objetivos y alcance; ii- Análisis de inventario) de cada sistema-producto será descrito a continuación dejando las fases iii- evaluación de impacto e iv- interpretación para la sección de resultados. El flujo de energía de los sistemas bajo estudio se analiza desde la obtención de las materias primas hasta la obtención de la unidad funcional y los subproductos según correspondan.

#### 2.1.1. Flujos de energía (Diagramas de Sankey)

Se realizó un diagrama de Sankey a partir del sitio web “<http://sankey-diagram-generator.acquireprocure.com>” para analizar el flujo de energía en cada uno de los tres sistemas, desde el producto obtenido en la etapa de campo (1 tn de rollo con un 15% de humedad), hasta su destino en cada uno de los sistemas bajo análisis. Se calculó el poder calorífico inferior (PCI) usando la ecuación propuesta por Golato et al., (2017):

$$PCI = PCS (1 - w) - 2512 * [9 * H * (1 - cz) * (1 - w) + w]$$

Donde

PCI: poder calorífico inferior ( $\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  de biomasa base húmeda),

PCS: poder calorífico superior medido con una bomba calorimétrica (IKA C5000),

w: contenido de humedad,

cz: contenido de cenizas y

H: el contenido de hidrógeno.

El contenido de hidrógeno y las cenizas de *S. argentinensis* fueron obtenidos de Rada Arias et al., (2020).

### **2.1.2. Análisis de ciclo de vida (ACV)**

Los sistemas se modelaron utilizando información primaria cuando se contó con la misma y datos bibliográficos para aquellos procesos para los cuales no se pudo obtener datos propios. Los datos para el inventario fueron procesados mediante Microsoft Excel y el software (Licencia académica) SimaPro 9.0.0.35 (PRé sustainability B.V., 2019). Se completó la evaluación del ciclo de vida siguiendo las normas ISO 14040 y 14044 (ISO, 2006a; b). El ACV se realizó con una perspectiva de la cuna a la tumba, es decir, desde la extracción de la materia prima hasta la disposición final del producto. Las cargas ambientales de los coproductos de cada sistema fueron contabilizadas mediante la expansión del sistema.

Considerando que la fuerza impulsora de las bioenergías es la mitigación del cambio climático y la seguridad energética, las siguientes categorías de impacto fueron evaluadas: (i) el cambio climático, utilizando el potencial de calentamiento global (GWP) con un tiempo horizonte de 100 años como indicador, y (ii) uso de energía con CED y EROI como indicadores.

#### **2.1.2.1. Gasificación para producir bioelectricidad**

##### **I. Objetivos y alcance**

El objetivo del EBe es producir e inyectar electricidad a la red eléctrica de medio voltaje. La figura 8 muestra el sistema producto de producción de electricidad y calor a partir de *S. argentinensis* desde la etapa de campo en la cual se incluyó la ruptura de tacurúes, corte con desmalezadora, rastrillado, rotoenfardado y transporte de los rollos hasta la planta de procesamiento. Esta etapa de campo fue también empleada para los demás sistemas-productos evaluados.

La UF es inyectar 1 MWh de electricidad al sistema interconectado argentino. La electricidad se generó a partir de la combustión del gas de síntesis obtenido por la gasificación de biomasa de *S. argentinensis* en un gasificador de 250 KW perteneciente a la empresa “Industrias Savini SRL ®”. Los sistemas de los escenarios EBe50 y EBe0 son equivalentes al que se muestra en la figura 8, con la única diferencia de que el calor obtenido por la combustión del gas de síntesis fue de 1,13 MWh y 0 MWh, respectivamente.

Se evaluaron los impactos ambientales de la utilización de la biomasa de *S. argentinensis* con tres escenarios bioenergéticos de electricidad (EBe) en función del aprovechamiento del calor de la combustión del gas de síntesis (EBe0, EBe50 y EBe90, para 0%, 50% y 90% de aprovechamiento, respectivamente). El estudio se realizó con fines comparativos de manera de poder contrastar los impactos de los EBe con el escenario actual de electricidad (EAe) representado por la electricidad del el mix energético argentino (Wernet et al., 2016).

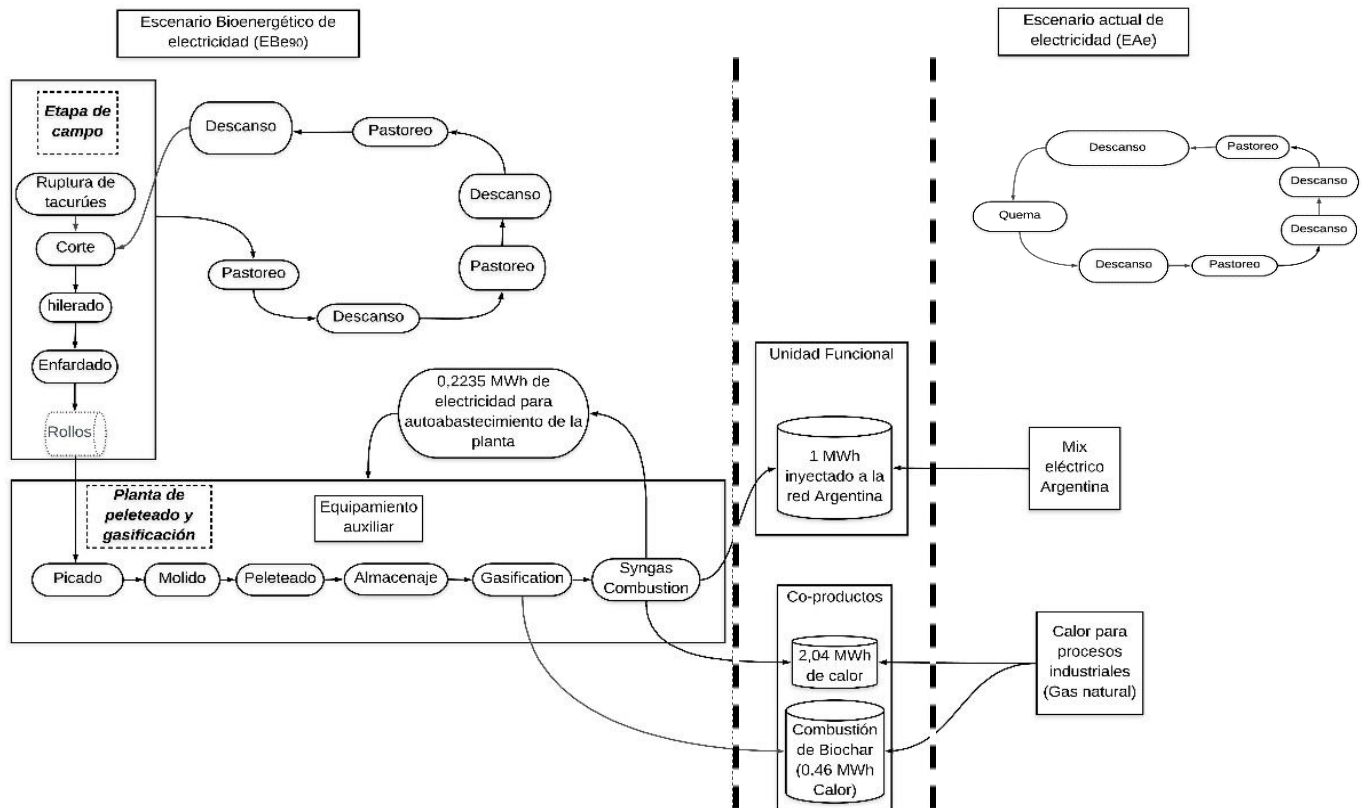


Figura 8: Límites del sistema EBe90 y su contraste con el actual sistema de producción de electricidad y calor industrial basado en energía fósil

## II. Análisis de inventario

Los datos de la etapa de campo se obtuvieron de un pastizal donde se cosechó una superficie de 14.000 m<sup>2</sup> (figura 9). La disponibilidad de biomasa fue de *circa* 700 g\*m<sup>-2</sup> de materia seca, con una eficiencia de cosecha de 48%: 337 g\*m<sup>-2</sup> de materia seca. La tabla 1 muestra los procesos involucrados en los EBe.



Figura 9: Izquierda: parcela cortada para obtención de rollos. Derecha: Algunos de los rollos quedaron en el lote como se puede apreciar en la imagen

Etapa	Flujo de referencia	Proceso	Valor	Unidad	Referencia/Factor de emisión
Campo	(1,16 Mg de rollos con 15% de humedad)	Carga y descarga de rollos	1,42	Rollos	(Wernet et al., 2016)
		Labranzas - operación de maquinaria (Diesel) a una potencia de 74,57 kW	0,35	Horas	(Wernet et al., 2016)*
		Ocupación del suelo	2669,49	m <sup>2</sup>	
		Transporte de rollos (30 km)	33,33	tkm	3lonk Agri Footprint BV, 2015a, 2015b)
Industria	1.22 MWh de electricidad (1 MWh inyectada a la red + 0,22 MWh para autoabastecimiento de la planta)	Combustión del biochar	49,55	kg	Factor de emisión: 3,2 g de CO <sub>2eq</sub> no biogénico por MJ, Huang et al (2013); PCS del biochar obtenido de Brewer (2012)
		Combustión del gas de síntesis	2303,8	m <sup>3</sup>	Factor de emisión adaptado del IPCC (2006)

\*Adaptado en función de mediciones de consumo de gasoil a campo

Tabla 1: Inventario de los procesos de EBe

La ocupación del suelo se calculó en función del rendimiento de biomasa mencionado. La electricidad requerida en la etapa industrial fue obtenida en una prueba realizada por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), donde se obtuvieron pellets de *S. argentinensis*. Estas pruebas contabilizaron los consumos energéticos para el picado y molido de la biomasa para obtener un material de un tamaño promedio de partícula de 0,2 a 0,5 mm y una densidad de 165 kg/m<sup>3</sup>. Este material pudo ser pelleteado sin necesidad de adicionar aglutinante puesto que la lignina (presente en altas concentraciones en esta biomasa) cumple ese rol.

Los pellets obtenidos, alcanzaron los parámetros físicos exigidos para la categoría ENplus-A1 (ISO, 2014) en la Unión Europea:

- Largo: 13,9 mm; Exigencia:  $3,15 \geq L \geq 40$
- Diámetro: 6,4 mm; Exigencia: 6,4 mm
- Humedad: 10%; Exigencia: menor o igual a 10%
- Densidad:  $798 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; Exigencia: Mayor a  $600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Durabilidad Mecánica: 99,6%; Exigencia:  $>97,5$
- Finos ( $<3,15 \text{ mm}$ ): 0,5%; Exigencia:  $<1\%$



Figura 10: Pellets de *S. argentinensis*

Se consideró que los requerimientos de electricidad de la planta de pelleteado y gasificación fueron cubiertos con la electricidad producida por la misma. Por lo tanto, para cumplir con la UF, se propuso producir un superávit de 0,22 MWh de electricidad. Esto se pudo realizar multiplicando a todos los procesos del sistema por un factor de 1,22.

La tabla 2 muestra los procesos evitados para cada EBe y puede observarse que al aumentar la proporción de energía térmica aprovechada, aumenta la cantidad de calor evitado por el sector industrial. Esto determinará una menor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>eq.

Proceso a reemplazar	Valores por UF			Unidades	Referencia	Proceso seleccionado para el reemplaz	Valor	Unidad
	EBe <sub>0</sub>	EBe <sub>50</sub>	EBe <sub>90</sub>					
Quema de pastizal	2923	2923	2923	m <sup>2</sup>	IPCC	Rollos	1,15	Mg
	742,3	742,3	742,3	MJ	Ecoinvent 3.5	Combustión de biochar	46,8	Kg
Calor para industria		4090		MJ	Ecoinvent 3.5	Combustión de gas de síntesis	2303,8	m <sup>3</sup>
			7360	MJ	Ecoinvent 3.5	Combustión de gas de síntesis	2303,8	m <sup>3</sup>

Tabla 2: Inventario de los procesos evitados en los EBe

Las emisiones de GEI producidas por la quema del pastizal fueron obtenidas mediante factores de emisión del Panel intergubernamental del Cambio Climático o IPCC por sus siglas en inglés, *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2006). El calor obtenido por la combustión del biochar se estimó a partir de Brewer et al., (2012) mientras que el calor obtenido a partir de la combustión del gas de síntesis en EBe50 y EBe90 se obtuvo a partir de datos de la empresa fabricante del gasificador y los valores brindados fueron consistentes con los encontrados en la bibliografía (Patuzzi et al., 2016).

### 2.1.2.2. Pellets para calefacción domiciliaria

#### I. Objetivos y alcance

El objetivo del sistema es producir calor para el sector residencial. La figura 11 muestra los límites del sistema considerado y en la tabla 3 se pueden apreciar todos los procesos involucrados en EBc. Algunos procesos de la tabla mantienen el nombre original en inglés del inventario de donde se obtuvieron.

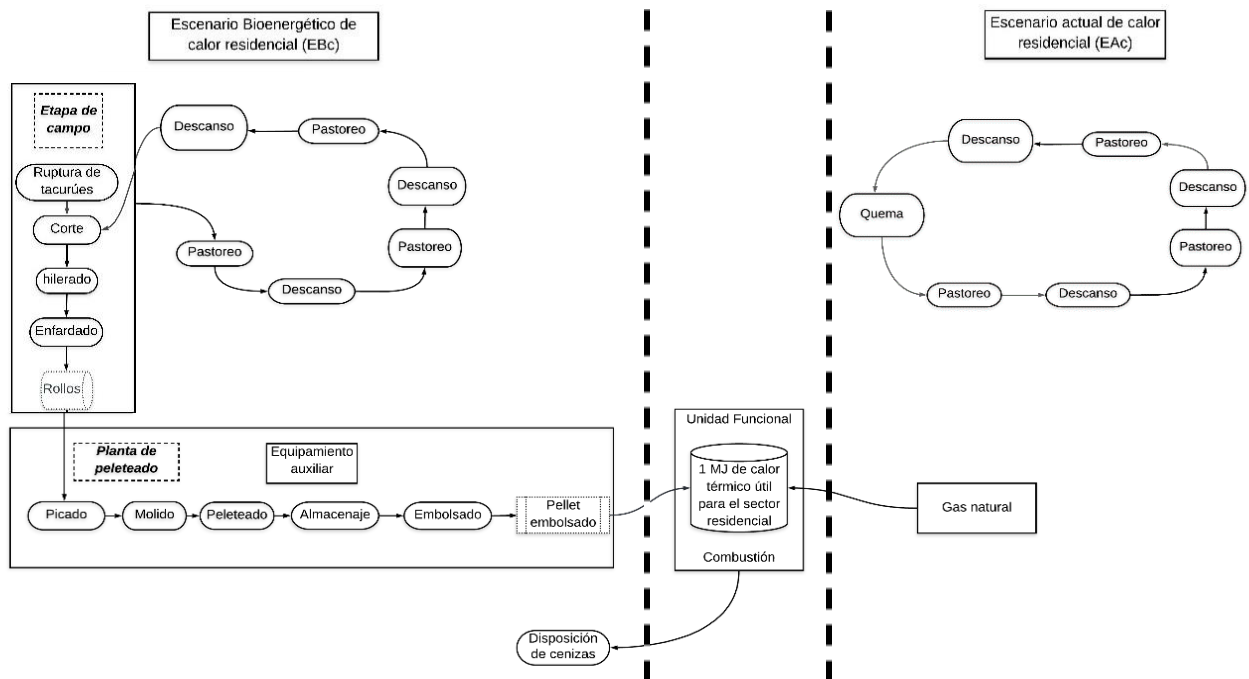


Figura 11: Límites del sistema EBc y su contraste con el actual sistema de producción calor residencial basado en energía fósil (EAc)

La UF es entregar 1 MJ de energía térmica útil para calefaccionar un ambiente domiciliario. Para el escenario alternativo (EBc) se consideró un 87% de eficiencia en las estufas a pellets (Oberberger et al., 2018), mientras que para el escenario actual de calor residencial (EAc) fue 70%. Este valor se obtuvo considerando un reporte del INTI en el cual se evaluó el desempeño de las estufas de tiro balanceado comúnmente utilizadas en la Argentina (Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2008).

## II. Análisis de inventario

Unidad Funcional	Etapas	Flujo de referencia	Proceso	Value	Unit	Referencia
1 MJ de energía térmica útil	Campo (Mg de rollos)	8,87E-5 Mg de rollos	Carga y descarga de rollos	1,4	Rollo	Wemet et al., 2016
			Labranzas - operación de maquinaria (Diesel) a una potencia de 74,57 kW	0,4	Horas	Wemet et al., 2016
			Ocupación del suelo	2669,5	m <sup>2</sup>	Datos de esta tesis
			Transporte de rollos (30 km)	33,3	tkm	Blonk Agri Footprint BV, 2015a, 2015b
	Industrial (Mg de pellet)	7,92E-05 Mg de pellet	Equipamiento auxiliar	7,15E-03	MJ	Datos de esta tesis
			Peleteado	1,95E-02	MJ	Datos de esta tesis
			Molido	6,22E-03	MJ	Datos de esta tesis
			Picado	9,15E-03	MJ	Datos de esta tesis
			Embolsado	4,75E-04	MJ	Datos de esta tesis
			Polietileno para las bolsas	4,75E-04	Kg	Wemet et al., 2016
			Planta industrial	1,43E-09	Unidad	Wemet et al., 2016
	Distribución		Transport, truck >20t, EURO1, 100%LF, default/GLO Mass	2,38E-03	tkm	Blonk Agri Footprint BV, 2015a, 2015b
	Uso		Combustión del pellet	1,00	MJ	
			Estufa para pellet, 9 kW	2,78E-06	Unidad	Wemet et al., 2016
	Disposición de cenizas		Wood waste, unspecified, combusted in industrial boiler/US	7,54E-06	Mg	USLCI, 2012

Tabla 3: Inventario de los procesos considerados en el EBc

El único proceso evitado (Tabla 4) es la quema del pastizal a razón de 0,2 m<sup>2</sup> por unidad funcional. Si bien podría evaluarse la posibilidad de reciclar las cenizas, considerando el estado actual de las prácticas domiciliarias de reciclaje (una práctica poco habitual en la Argentina), se decidió abordar un escenario de disposición final de cenizas como residuo.

Proceso a reemplazar	Valores por UF EBc	Unidades	Referencia	Proceso seleccionado para el reemplazo	Valor	Unidad
Quema de pastizal	0,2	m <sup>2</sup>	IPCC, 2006	Rollos	8,87E-05	Mg

Tabla 4: Inventario de los procesos evitados en EBc

### 2.1.2.3. Bioetanol para el transporte

#### I. Objetivos y alcance

El objetivo del sistema es producir energía para el transporte vehicular. El sistema producto se puede observar en la figura 12. Se consideró un rendimiento de 241 litros de etanol por Mg de espartillo lo cual representa un 60% del rendimiento potencial (Jozami et al., 2013).

La UF es obtener 1 MJ de combustible líquido de manera tal de poder realizar comparaciones con el combustible fósil a reemplazar (nafta). Los datos de etapa industrial se adaptaron en base a tres citas bibliográficas (Jungbluth et al., 2007; Luo et al., 2009; Kumar y Murthy, 2012). Solo se consideró para la referencia de Luo et al., (2009) aprovechar los residuos sólidos de la biorefinería para producir la electricidad y calor requeridas por la misma, ya que

el inventario está claramente presentado en esa publicación. Las cargas ambientales de la biorrefinería de Jungbluth et al. (2007), corresponden a una asignación económica entre etanol, fibras y proteínas obtenidas a partir de pasto y no plantea el uso de energía autoabastecida para la planta de fermentación. Si bien Kumar y Murthy (2012) sí plantean un aprovechamiento de la energía eléctrica y térmica coproducida, estos coproductos no fueron contemplados para ese caso por no estar claramente detallados en esa publicación.

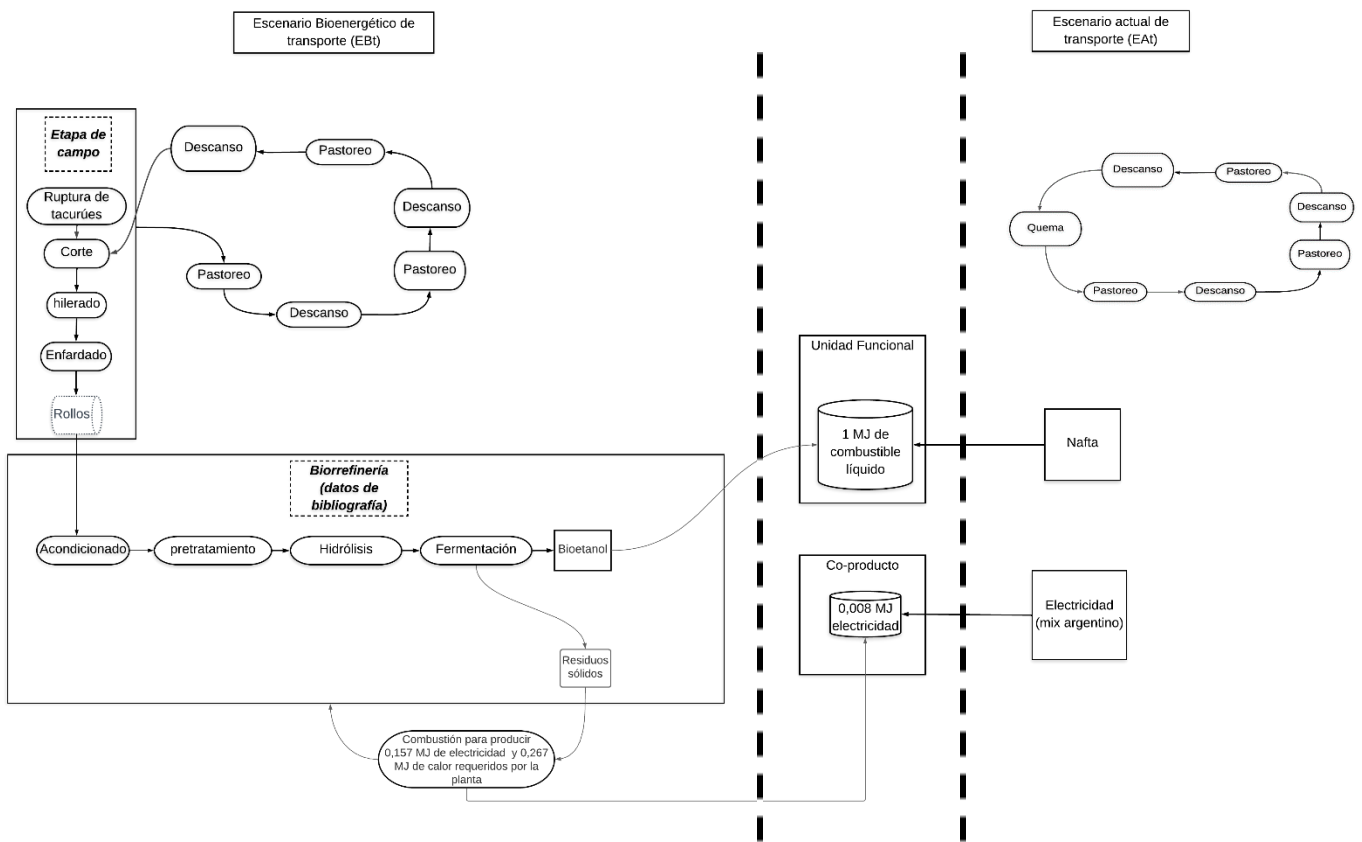


Figura 12: Límites del sistema EBt y su contraste con el actual sistema de producción de combustible líquido (Nafta) para el transporte basado en energía fósil

## II. Análisis de inventario

En la tabla 5 se pueden apreciar todos los procesos involucrados en EBt, empleando la referencia de Luo et al., (2009) para la etapa industrial.

Unidad Funcional	Etapa	Flujo de referencia	Proceso	Valor	Unidad	Referencia		
uso de 1 MJ de combustible	8.87E-5 (Mg de rollos)	2,27E-04	Carga y descarga de rollos	1,40	Rollo	Wemet et al., 2016		
			Labranzas - operación de maquinaria (Diesel) a una potencia de 74,57 kW	0,40	Horas	Wemet et al., 2016		
			Ocupación del suelo	2669,5	m <sup>2</sup>	Datos de esta tesis		
			Transporte de rollos (30 km)	33,3	Tkm	Blonk Agri Footprint BV, 2015a, 2015b		
	Industrial (Kg de Bioetanol)	3,72E-02	Manipulación de biomasa (Electricidad)	285,5	KJ	Luo et al 2009		
			Pretratamiento (Ácido Sulfúrico)	0,1	kg			
			Pretratamiento (Calor)	0,1	kg			
			Pretratamiento (Electricidad)	252,2	KJ			
			Pretratamiento (Calor)	5327,2	KJ			
			Producción de enzimas (Electricidad)	0,3	kg			
			Producción de enzimas (Electricidad)	2585,7	KJ			
			Sacarificación y cofermentación (Electricidad)	247,0	KJ			
			Recuperación de productos (Electricidad)	244,9	KJ			
			Recuperación de productos (Calor)	1840,5	KJ			
			Tratamiento de agua residual (Electricidad)	214,1	KJ			
			Enfriamiento de agua (Electricidad)	328,5	KJ			
			Distribución	Transporte de bioetanol (100 km)	0,004		Tkm	Blonk Agri Footprint BV, 2015a, 2015b

Tabla 5: Inventario de los procesos considerados en el EBt

Los procesos evitados por EBt se muestran en la tabla 6.

Proceso a reemplazar	Valores por UF Ebt	Unidades	Referencia	Proceso seleccionado para el reemplazo	Valor	Unidad
Electricidad Argentina	8,04	KJ	Luo et al 2009	Bioetanol	3,72E-02	Kg
Quema de pastizal	0,57	m <sup>2</sup>	IPCC, 2006	Rollos	2,27E-04	Mg

Tabla 6: Procesos evitados en el EBt

## 2.2. Estimación de biomasa

Se desarrollaron dos tipos de modelos: i) modelos de regresión lineal múltiple para predecir la biomasa total y las fracciones verdes y senescentes de biomasa, utilizando como variables explicativas a las bandas espectrales e índices de vegetación (variables cuantitativas) descriptos en la sección 2.2.2. y la estación (variable cualitativa dummy: otoño y primavera); y ii) modelo de clasificación en función de la cantidad de biomasa total. Los modelos son descriptos en la sección 2.2.5 en mayor detalle. A continuación, se detallan las zonas de cosecha de biomasa de *S. argentinensis*, fechas de muestreo, número de muestras, ubicación de las mismas y mediciones obtenidas con antelación a la cosecha.

### 2.2.1. Zona de trabajo

Se trabajó en un espartillar de la Reserva de Usos Múltiples Federico Wildermuth (32° 0,5' S; 61° 24,9' O) en tres fechas, con 10 muestras cada una: 15/3/2018; 7/9/2018 y 20/2/2019 y en

un espartillar de un establecimiento privado ( $32^{\circ} 05' S$   $61^{\circ} 21' O$ ) en dos fechas, con 30 muestras cada una: 09/10/2019 y 12/03/2020. En cada fecha se colocaron 10 puntos de muestreo distanciados a 50 m entre sí y delimitados con 4 estacas a las cuales se sujetó una tela amarilla de 50 cm x 100 cm, fácilmente visibles desde el dron (figura 13). En las primeras tres fechas, luego de producido el vuelo en el cual se obtuvieron las imágenes, se realizaron las cosechas de biomasa en algún punto cardinal respecto a la tela (este, norte u oeste ya que el punto sur fue usado para transitar durante las operaciones de colocación de las estacas).

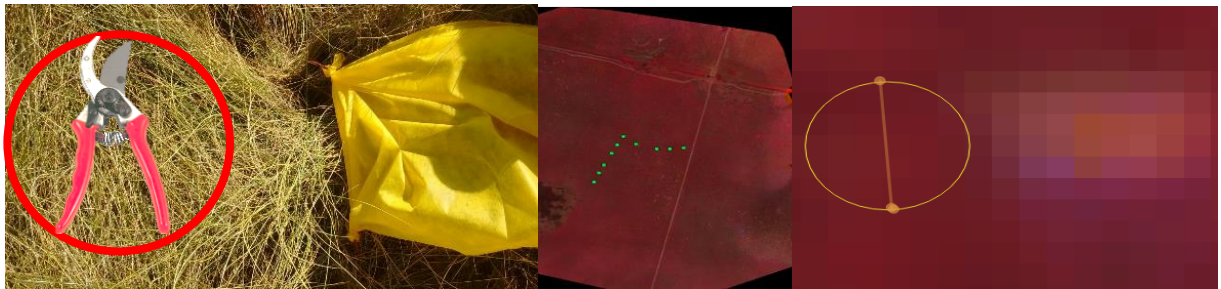


Figura 13: Parcela de muestreo al oeste del paño (izquierda); Parcelas de muestreo en Wildermuth e imagen del paño y el sector que representaría al área cosechada (derecha).

En las últimas dos fechas, se cosecharon 3 muestras (este, norte y oeste) por zona de muestreo como se puede apreciar en la figura 14.

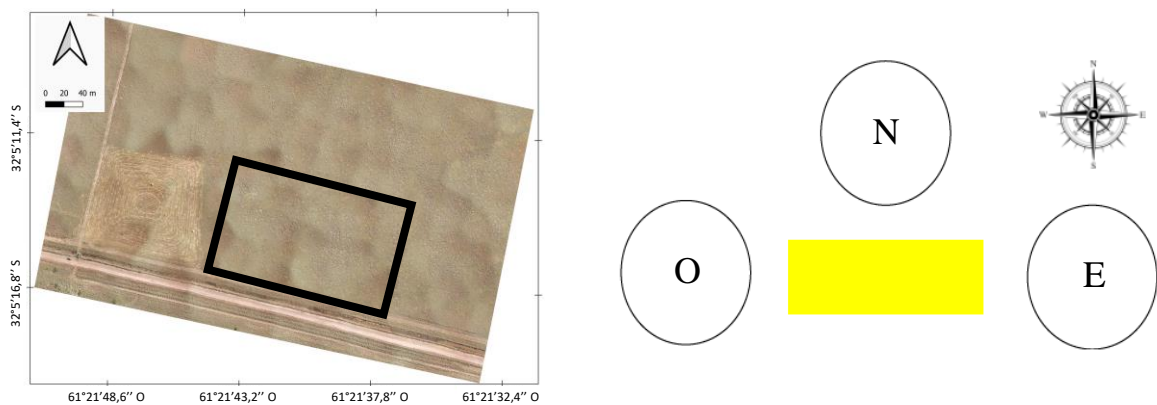


Figura 14: Zona de trabajo en el espartillar delimitado por el rectángulo negro (izquierda) y ejemplo de un paño con las tres zonas de muestreo

### 2.2.2. Variables explicativas obtenidas desde el dron

Se utilizó un dron eBee sensefly de ala fija, realizando un vuelo a 121 m (resolución espacial de 8 cm) y una cámara modelo Parrot Sequoia con 4 canales espectrales (figura 15): verde, rojo, borde rojo e Infra rojo cercano.

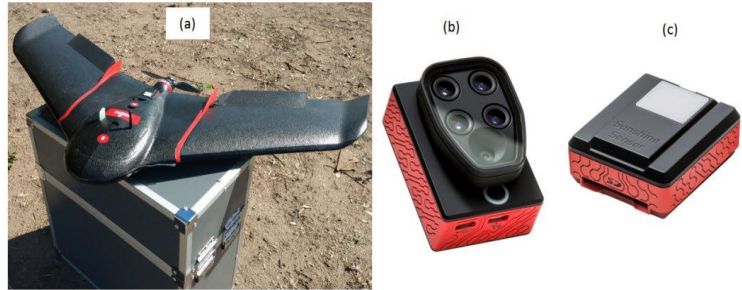


Figura 15: Plataforma de vehículo aéreo no tripulado (eBee SQ). (a); cámara multiespectral (b); sensor de luz solar (c).

La tabla 7 resume las variables explicativas: 4 bandas espectrales y 14 índices derivados de las mismas con sus nombres en inglés, la traducción al español y la cita correspondiente. Se presentó además la ecuación de cada índice.

Banda/Índice espectral	Nombre en español	Ecuación/rango de banda (nm)	Cita
<b>Verde (Gr)</b>		530-570	
<b>Rojo (Rd)</b>		640-680	
<b>Borde Rojo (Re)</b>		730-740	
<b>Infrarrojo cercano (NIR)</b>		770-810	
1. <b>NDVI:</b> <i>normalized difference vegetation index</i>	Índice de vegetación de diferencia normalizada	$(\text{NIR}-\text{Rd})/(\text{NIR}+\text{Rd})$	(Rouse et al., 1974)
2. <b>NGRDI:</b> <i>Normalized green red difference index</i>	Índice de diferencia verde-rojo normalizado	$(\text{Gr}-\text{Rd})/(\text{Gr}+\text{Rd})$	(Hunt et al., 2011)
3. <b>NDRE:</b> <i>normalized difference Red Edge index</i>	Índice Normalizado Diferencial de Borde Rojo	$(\text{NIR}-\text{Re})/(\text{NIR}+\text{Re})$	(Barnes et al., 2000)
4. <b>SR:</b> <i>Simple Ratio</i>	Índice de Relación Simple	$\text{NIR}/\text{Red}$	(Jordan, 1969)
5. <b>GNDVI:</b> <i>Green normalized difference vegetation index</i>	Índice de vegetación de diferencia normalizada Verde	$(\text{NIR}-\text{Gr})/(\text{NIR}+\text{Gr})$	(Louhaichi et al., 2001)
6. <b>GRVI:</b> <i>green-red vegetation index</i>	Índice de vegetación Verde-Rojo	$\text{NIR}/\text{Gr}$	(Sripada et al., 2005)
7. <b>CI_green:</b> <i>chlorophyll index Green</i>	Índice de clorofila Verde	$(\text{NIR}/\text{Gr})-1$	(Gitelson et al., 2003)
8. <b>CI_re:</b> <i>chlorophyll index Red Edge</i>	Índice de clorofila Borde Rojo	$(\text{NIR}/\text{Re})-1$	(Gitelson et al., 2003)
9. <b>PSRI:</b> <i>plant senescence reflectance index</i>	Índice de reflectancia de senescencia de las plantas	$(\text{Rd}-\text{Gr})/\text{NIR}$	(Merzlyak et al., 1999)
10. <b>OSAVI:</b> <i>optimized soil adjusted vegetation index</i>	Índice de Vegetación Ajustado de Suelo optimizado	$(1+0,16)+((\text{NIR}-\text{Rd})/(\text{NIR}+\text{Rd}+0,16))$	(Rondeaux et al., 1996)
11. <b>TCARI:</b> <i>transformed chlorophyll absorption reflectance index</i>	Índice de reflectancia en absorción de clorofila transformada	$3*((\text{Re}-\text{Rd})-0,2*(\text{Re}-\text{Gr})*(\text{Re}/\text{Rd}))$	(Daughtry, 2000)
12. <b>TCARI/OSAVI</b>	-	$\text{xi}/\text{x}$	(Haboudane et al., 2002)
13. <b>Meris CI:</b> <i>medium resolution imaging spectrometer - cyanobacteria index</i>	Espectrómetro de imágenes de resolución media - índice de cianobacterias	$(\text{NIR}-\text{Re})/(\text{Re}-\text{Rd})$	(Dash y Curran, 2004)
14. <b>NDWI:</b> <i>normalized difference water index</i>	Índice normalizado diferencial de agua	$(\text{Gr}-\text{NIR})/(\text{Gr}+\text{NIR})$	(Mc Feeters, 1996)

Tabla 7: Bandas e índices espectrales obtenidos del espartillo desde el dron

### 2.2.3. Firmas espectrales - Espectrofotómetro

En las últimas dos cosechas de biomasa (30 muestras en cada una), se incorporó la medición de reflectancia con un espectrofotómetro (ESP) visible (rango espectral: 339,08 nm - 824,44 nm) y otro infrarrojo cercano (rango espectral: 632,61 nm - 1125,05 nm) marca Ocean Insight (figura 16). Una vez que el dron completó el vuelo, se obtuvieron medidas de reflectancia de cada unidad experimental obteniéndose diez espectros por muestra. Se eliminaron de cada muestra, aquellos espectros que se encontraban a más de dos desvíos respecto a la media en alguno de los valores de reflectancia de la firma espectral obtenida. El espectro de cada instrumento tiene 1024 valores de longitud de onda en su rango de medición, con una resolución FWHM (*Full Width at Half Maximum*) de aproximadamente 3 nm. Todas las muestras se obtuvieron entre las 10:00 y las 11:00 horas (UTC-03:00).



Figura 16: Espectrofotómetro utilizado

### 2.2.4. Cosecha de biomasa

La cosecha manual de biomasa de *S. argentinensis* en los círculos de muestreo se realizó por encima de los 15-20 cm de la superficie (biomasa a menor altura no sería posible cosechar con maquinaria segadora debido a la dureza de los tejidos basales), dentro de un anillo de 1 m<sup>2</sup>, ubicado a 20 cm de la tela amarilla (figura 13). Se determinó el peso seco (72 h a 60 °C) de las dos fracciones (hojas verdes y senescentes, figura 17).

Para las últimas dos fechas, se procesaron los datos del dron y del espectrofotómetro mediante figuras y tablas dinámicas con Microsoft Excel de manera tal de evaluar el comportamiento espectral en función de la estación, la fracción de senescencia y la cantidad de biomasa (separado en un ranking en función de los cuartiles).

La tabla 8 resume las fechas, sitios, muestras por fecha e instrumental utilizado en cada ocasión. Se realizó una caracterización ambiental en función a la información obtenida de la estación meteorológica del Sauce Viejo (31°42'S 60°50'O), provincia de Santa Fe, que fue suministrada por el Servicio Meteorológico Nacional.

Sitio	fecha	dron/ESP	Nro de Muestras
Reserva F. Wildermuth	15/03/2018	dron	10
Reserva F. Wildermuth	7/09/2018	dron	10
Reserva F. Wildermuth	20/02/2019	dron	10
Establecimiento privado	09/10/2019	dron y ESP	30
Establecimiento privado	12/03/2020	dron y ESP	30

Tabla 8: Datos de los muestreos realizados



Figura 17: Muestra procesada donde se observa la biomasa verde a la izquierda y la senescente a la derecha

### 2.2.5. Modelos predictivos de biomasa cuantitativos y cualitativos

Para la estimación de biomasa, se aplicó un modelo de regresión lineal múltiple considerando las variables explicativas cuantitativas de la tabla 7 y las cualitativas: i- estación (primavera y otoño) y; ii- sitio (reserva y establecimiento privado). Las variables respuestas fueron biomasa total, biomasa senescente y biomasa verde. Se utilizó como técnica de selección de variables la Regresión paso a paso (*Stepwise*) basada en el criterio de información de Akaike. Esta técnica consiste en la construcción iterativa de un modelo de regresión agregando o eliminando variables explicativas potenciales sucesivamente, probando la significancia después de cada iteración. Una vez obtenido el modelo, se evaluó su desempeño mediante los siguientes indicadores: NRMSE;  $R^2$ ; la eficiencia del modelo (EF) y el índice de acuerdo (d) según proponen Hao et al. (2021).

Se realizó también un modelo cualitativo de clasificación de biomasa total en cuatro grupos (1: biomasa total menor al 1er cuartil; 2: biomasa total entre el 1er cuartil y la mediana; 3: biomasa total entre la mediana y el 3er cuartil; y 4: biomasa total mayor al 3er cuartil). Dicho modelo se realizó mediante un algoritmo de aprendizaje automático de *Random forests* (bosques aleatorios). *Random forest* (Breiman, 2001) es un método de árbol de regresión y clasificación no paramétrico que utiliza conjuntos (bosques) de árboles de clasificación o regresión, en el cual cada árbol selecciona y permuta subconjuntos aleatorios de variables

predictoras. El procedimiento de iteración y aleatorización acomoda respuestas no lineales, variables categóricas o continuas y valores perdidos. Este método puede manejar interacciones complejas entre variables y ha sido útil para construir modelos de productividad y biomasa de sensores remotos (Ramoelo et al., 2015; Zeng et al., 2019; Gao et al., 2020).

Para la fecha 9 de octubre de 2019, se corrieron el modelo cualitativo y el modelo cuantitativo para biomasa total sin sitio, en un polígono con 2.277.003 pixels

### 2.2.6. Caracterización ambiental

Se realizó una caracterización de las variables climáticas en función de la serie histórica de la estación meteorológica de El Trébol dependiente del Servicio Meteorológico Nacional que es la más cercana a las zonas de cosecha (aproximadamente 35 km). Se evaluaron los promedios mensuales de temperatura máxima y mínima y de variables relacionadas a la condición hídrica: precipitaciones y almacenaje de suelo estimado mediante la metodología de Thornthwaite (1948). Estos datos fueron procesados con Rstudio para la obtención de gráficas de boxplot mostrando la dispersión histórica a las cuales se solaparon los valores de los años 2018, 2019 y 2020 durante los cuales se realizaron las cosechas.

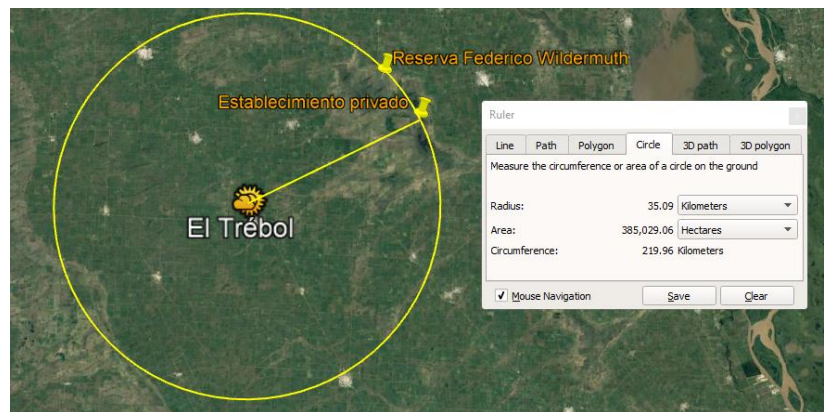


Figura 18: imagen satelital obtenida de Google Earth en la cual se observa la distancia de los sitios de muestreo hasta la estación meteorológica con la cual se realizó la caracterización ambiental.

### 2.2.7. Caracterización de la firma espectral

Para las 60 muestras en las cuales se midió reflectancia tanto con el dron como con el espectrofotómetro, se caracterizaron las firmas espectrales filtrando en función de i- la estación (primavera y otoño) para evaluar el efecto del estado fenológico (30 muestras por fecha); ii- el nivel de senescencia (bajo, medio y alto con 20 muestras por nivel); y iii- ranking de biomasa total (con cuatro grupos de 15 muestras cada uno).

## RESULTADOS

En esta sección se presentarán: 3.1) los flujos energéticos de los tres EB; 3.2) la evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV); y 3.3) los modelos de estimación de biomasa obtenidos

### 3.1. Flujos de energía (Diagramas de Sankey)

En las figuras 18, 19 y 20 se pueden apreciar los flujos energéticos de los escenarios EBc, EBe90 y EBt, respectivamente. El escenario de bioetanol es el de mayores pérdidas energéticas, con lo cual, es el que tiene mayor margen de mejora, en caso de poder aprovecharse con mayor eficiencia la energía de la biomasa.

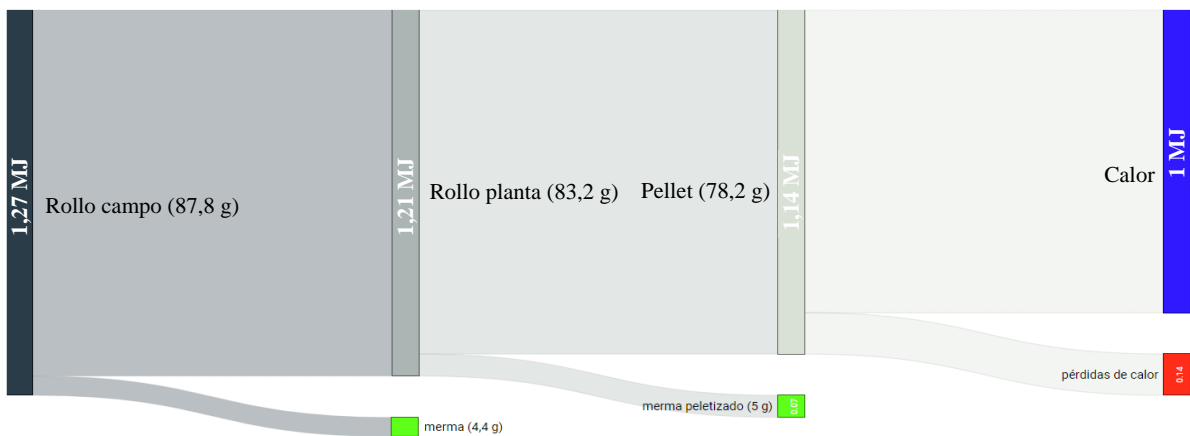


Figura 18: Flujo de energía del escenario EBc. Los números de las barras verticales indican la energía (en MJ) y el alto de las barras es proporcional al contenido energético. En azul, rojo y verde se indican la energía aprovechada, las pérdidas de calor y las mermas de biomasa durante el acarreo, respectivamente.

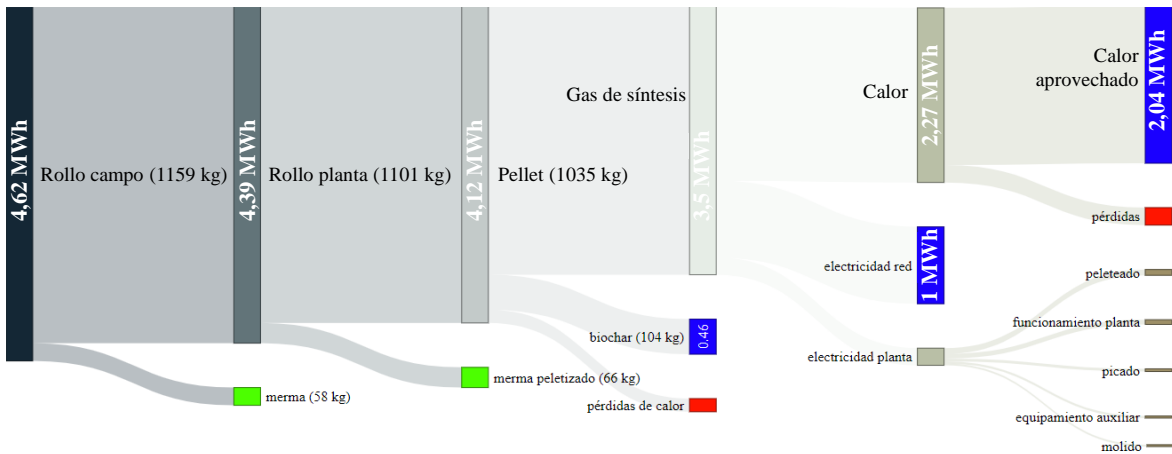


Figura 19: Flujo de energía de la gasificación en el escenario EBe90. Los números de las barras verticales indican la energía (en MWh) y el alto de las barras es proporcional al contenido energético. En azul, rojo y verde se indican la energía aprovechada, las pérdidas de calor y las mermas de biomasa durante el acarreo, respectivamente.

Puede observarse que la eficiencia energética (valores en color azul divididos por la energía inicial de los rollos ubicados en el campo) del sistema producto EBe90 es 75,5% de la energía (para EBe0 la eficiencia es 31,6%), para EBt es 29,4% y para EBc es 78,6%.

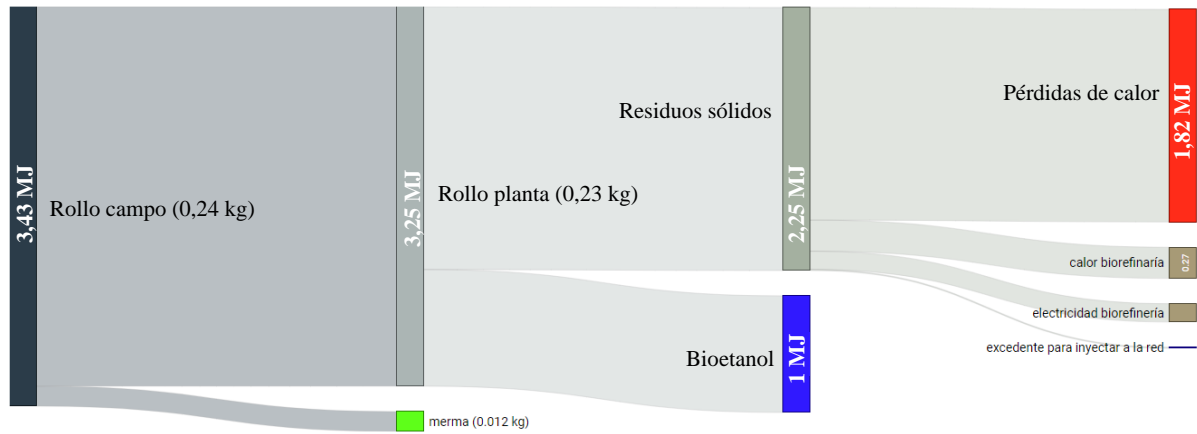


Figura 20: Flujo de energía del escenario EBt con datos de Luo et al. (2009). Los números de las barras verticales indican la energía (en MJ) y el alto de las barras es proporcional al contenido energético. En azul, rojo y verde se indican la energía aprovechada, las pérdidas de calor y las mermas de biomasa durante el acarreo, respectivamente.

## 3.2. Evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV)

### 3.2.1. Gasificación para producir bioelectricidad

#### 3.2.1.1. Cambio climático (CC)

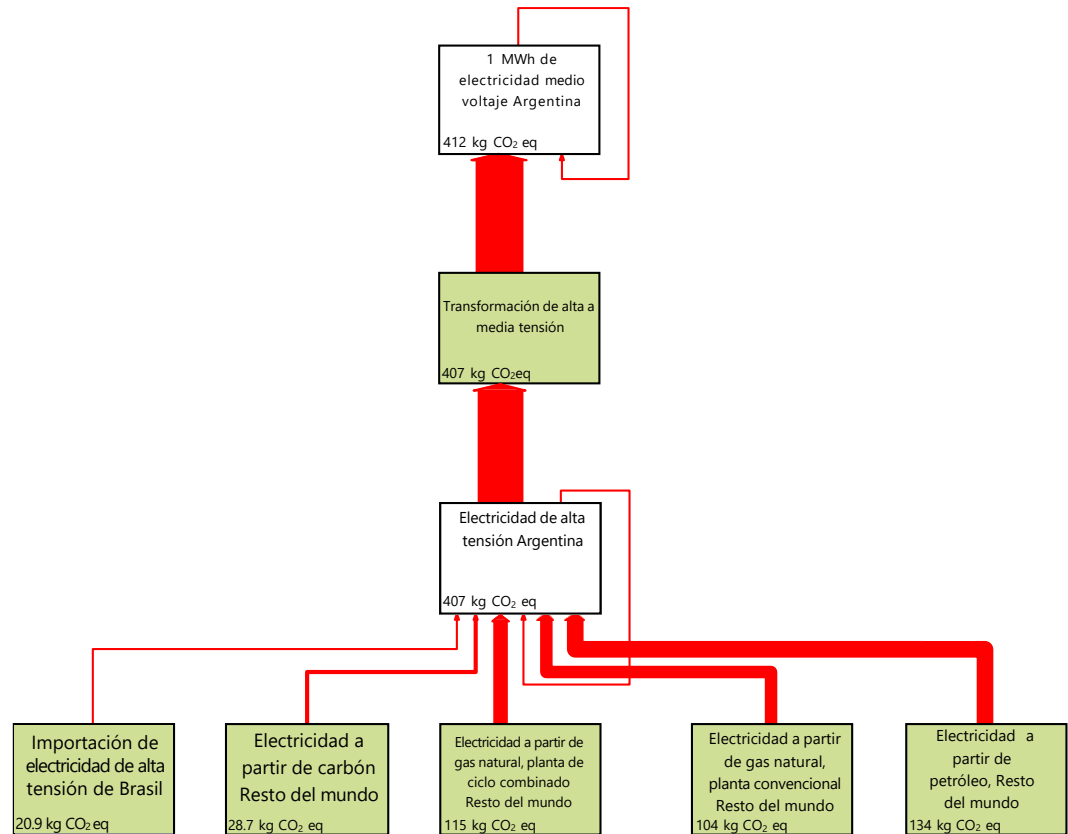


Figura 21: Diagrama de redes adaptado de SimaPro de las emisiones de CO<sub>2</sub>eq del mix eléctrico argentino (EAe) para producir 1 MWh de electricidad de medio voltaje. Los procesos en inglés se mantienen con su nombre original ya que no se pueden modificar en el software.

La figura 21 muestra las emisiones de CO<sub>2</sub>eq producidas a lo largo de la cadena de producción y distribución de electricidad de medio voltaje en la Argentina (Wernet et al., 2016). El total de emisiones por MWh es 412 kg de CO<sub>2</sub>eq. Por lo poco significativa en cuanto a emisiones de GEI (solo aporta 1,49 kg de CO<sub>2</sub>eq), no aparece en el diagrama la energía hidroeléctrica, a pesar de aportar más del 30% de la energía eléctrica del país. Se detallarán a continuación los escenarios bioenergéticos planteados para cumplir con la misma UF.

Las figuras 22, 23 y 24 muestran las emisiones de los escenarios EBe90, EBe50, y EBe0, respectivamente, y se evidencia en las mismas la notoria diferencia en el aprovechamiento del calor de la cogeneración. Los resultados muestran que, por un lado, las emisiones producidas

son menos de la mitad del EAe (205,4 kg de CO<sub>2</sub>eq entre la etapa de campo y la industrial), mientras que las emisiones evitadas incluso en el escenario bioenergético más pesimista (donde se evitan 329 kg CO<sub>2</sub>eq por la quema del pastizal y 130 CO<sub>2</sub>eq por el calor del biochar) son mayores que las generadas en dicho escenario. El resultado, por consiguiente, es un sistema producto carbono negativo en el cual las emisiones de la etapa industrial y la etapa de campo emiten 141 y 64,4 kg de CO<sub>2</sub>eq, respectivamente.

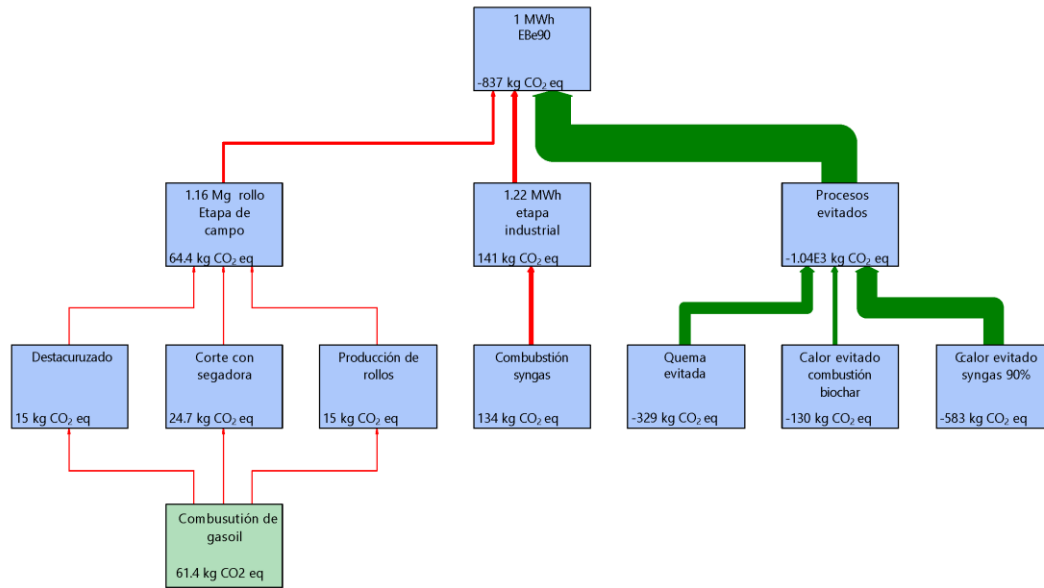


Figura 22: Diagrama de redes adaptado de SimaPro de las emisiones de CO<sub>2</sub>eq de EBe90. Las flechas rojas y verdes indican las emisiones producidas y evitadas, respectivamente.

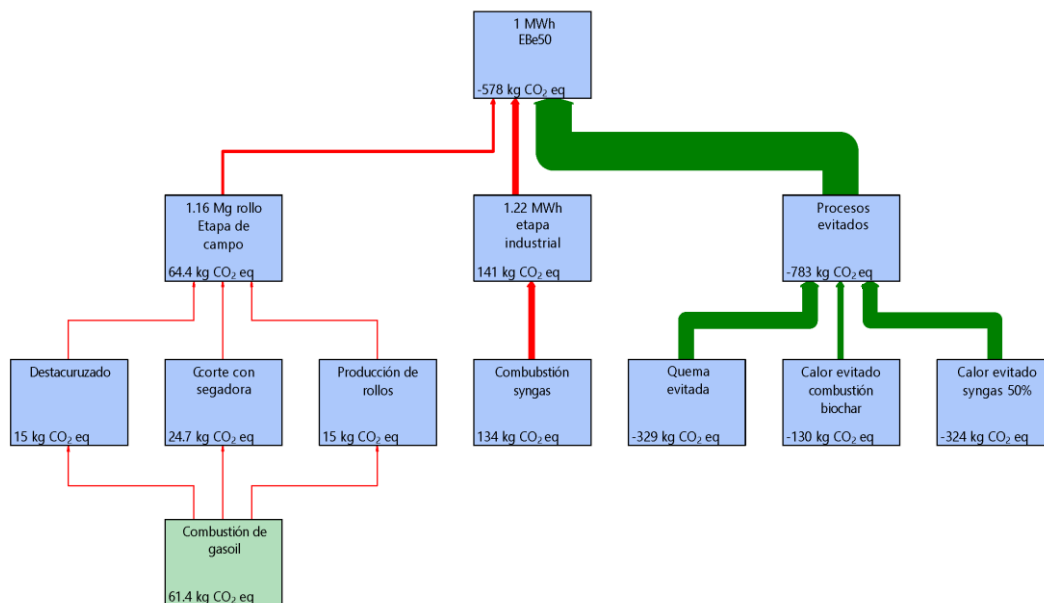


Figura 23: Diagrama de redes adaptado de SimaPro de las emisiones de CO<sub>2</sub>eq de EBe50. Las flechas rojas y verdes indican las emisiones producidas y evitadas, respectivamente.

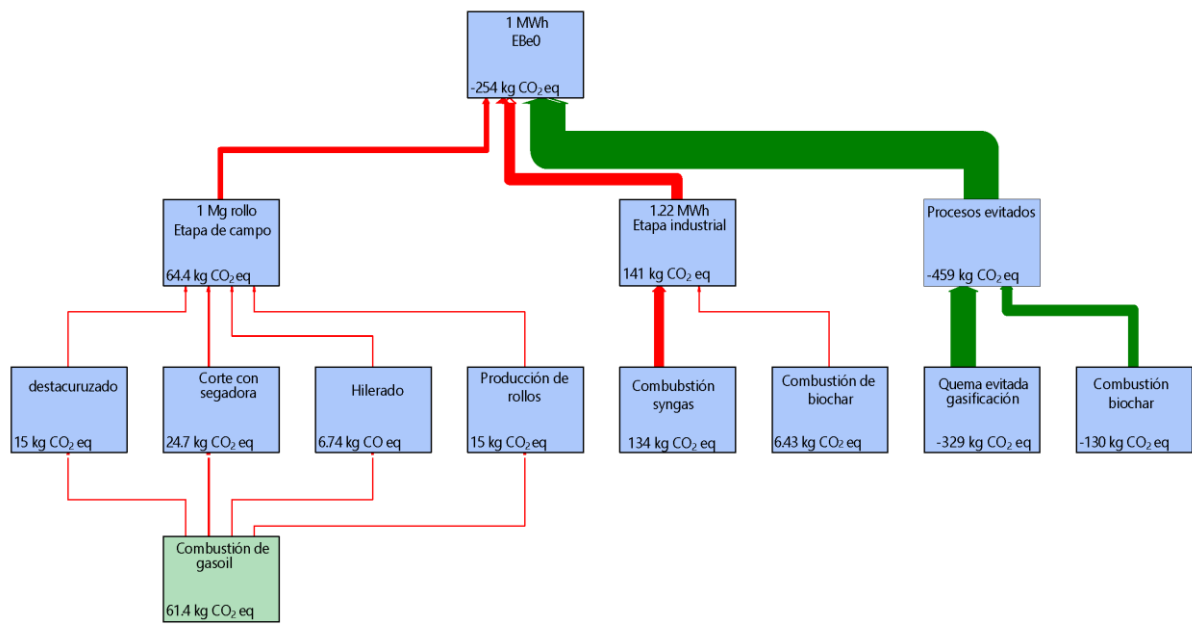


Figura 24: Diagrama de redes adaptado de SimaPro de las emisiones de CO<sub>2</sub>eq de EBe0. Las flechas rojas y verdes indican las emisiones producidas y evitadas, respectivamente.

La figura 25 resume las emisiones de los tres EBe y el EAe. Puede observarse lo relevante que resultan los procesos evitados (aquellos con emisiones negativas) en el resultado final de los EBe, puesto que son de mayor magnitud que las emisiones generadas en cada sistema-producto.

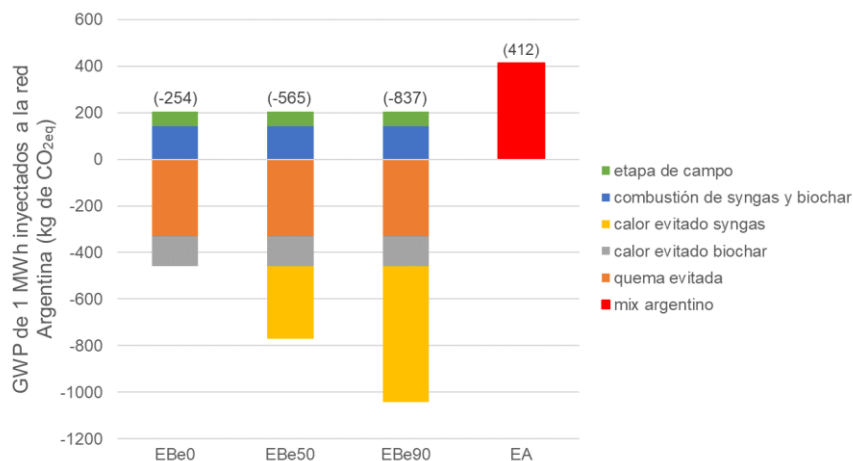


Figura 25: Resultado de GWP para los tres escenarios bioenergéticos y el actual. Los números entre paréntesis indican el resultado de emisiones producidas – emisiones evitadas por UF para cada escenario

### 3.2.1.2. Uso de energía

La figura 26 muestra que para inyectar 1 MWh a la red argentina, se requieren 2,32 MWh. La mayor parte de estos requerimientos provienen de la etapa de producción de electricidad fundamentalmente a partir de la combustión de gas natural. La electricidad obtenida a partir del petróleo (fueloil) también representa una parte importante. Esto último es relevante ya que solo el 30% de la energía del fueloil se transforma a energía eléctrica lo cual resulta muy ineficiente en comparación con las demás fuentes (tanto fósil como renovable).

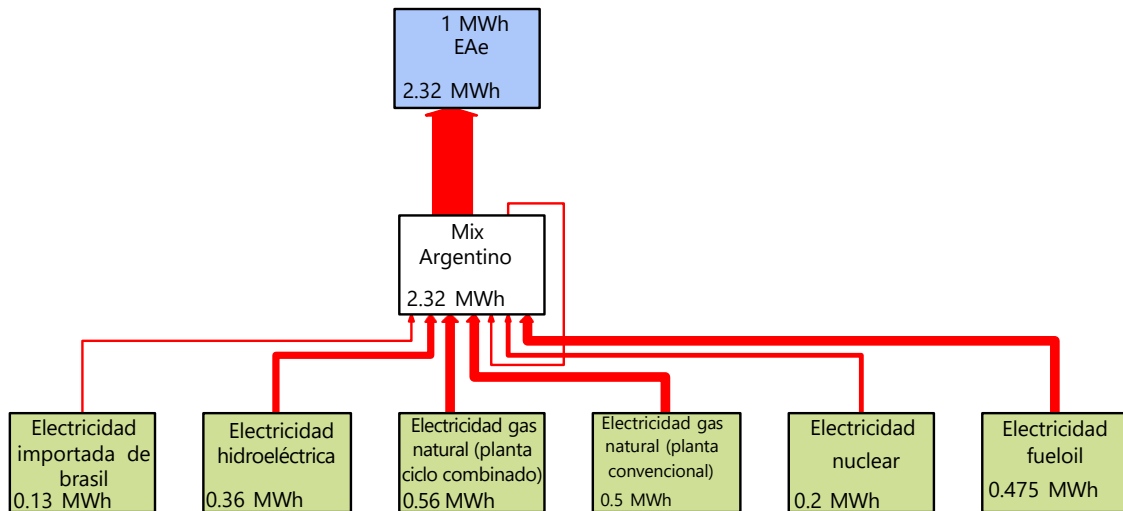


Figura 26: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para la producción de electricidad en la Argentina (UF: 1 MWh inyectado a la red).

Las figuras 27, 28 y 29 muestran las demandas de energía acumulada para los EBe90, EBe50 y EBe0, respectivamente. En los tres EBe resulta mayor la cantidad de energía que se evita utilizar que la consumida en los procesos del sistema. La etapa industrial no consume energía ya que ésta es abastecida por la propia planta de gasificación. Algunas de las sub-etapas dentro de la etapa de campo no aparecen en la figura por no alcanzar el 1% del valor final de CED establecido como umbral para considerarse en el diagrama de red exportado desde SimaPro.

La energía que se evita emplear es de 2,91 MWh, 1,86 MWh y 0,53 MWh para EBe90, EBe50 y EBe0, respectivamente, lo cual refleja lo importante que sería poder emplear el calor de cogeneración para aumentar al máximo la eficiencia energética del sistema producto. Obviamente esta recomendación no resulta tan operativa debido a que el calor de la

cogeneración no puede transportarse y solo puede aprovecharse en algún proceso industrial *in situ*.

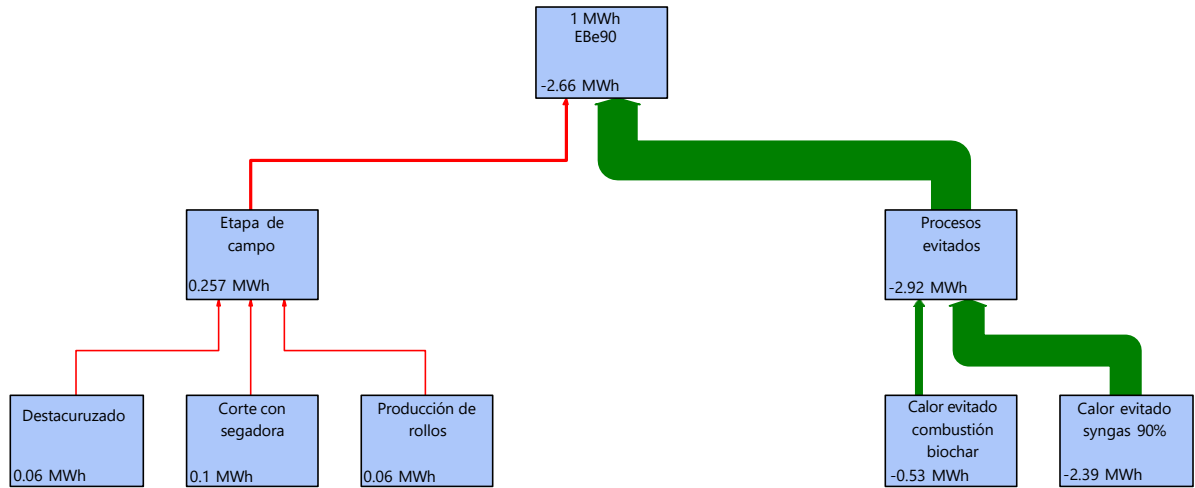


Figura 27: Diagrama de redes adaptado de SimaPro, mostrando la demanda energética acumulada (CED) para EBe90

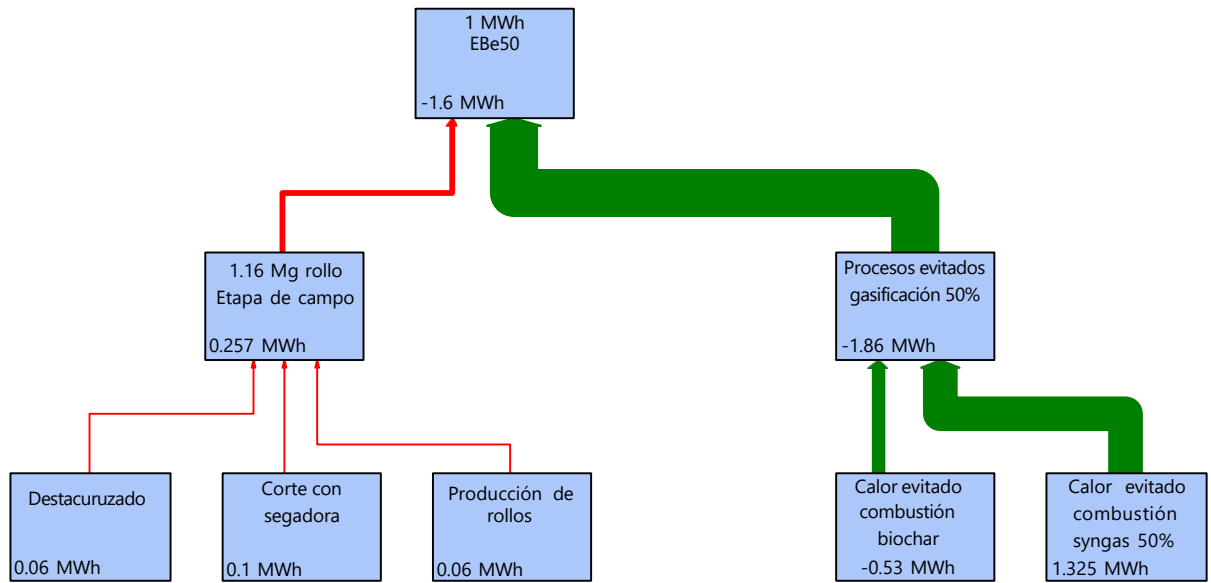


Figura 28: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para EBe50

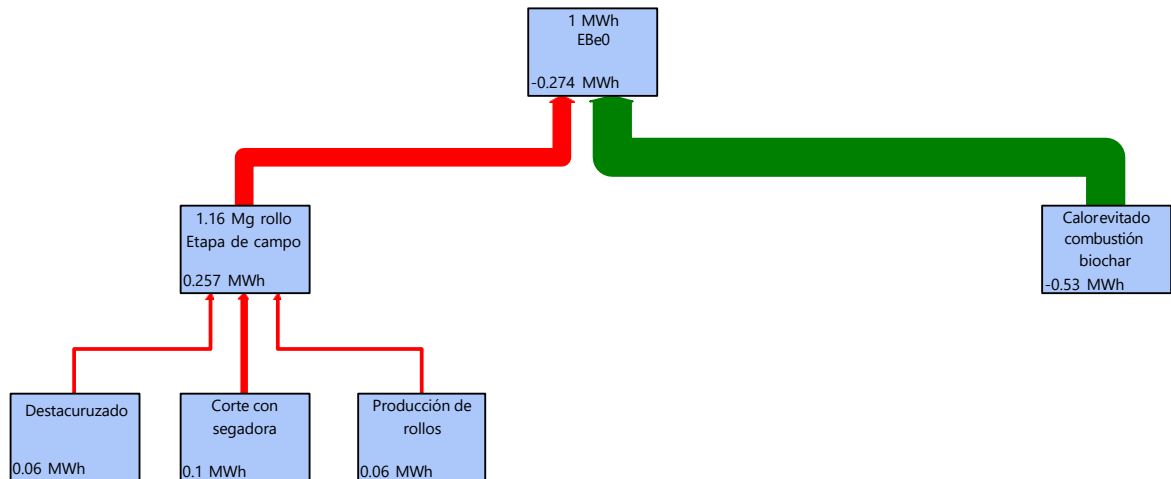


Figura 29: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para EBe0

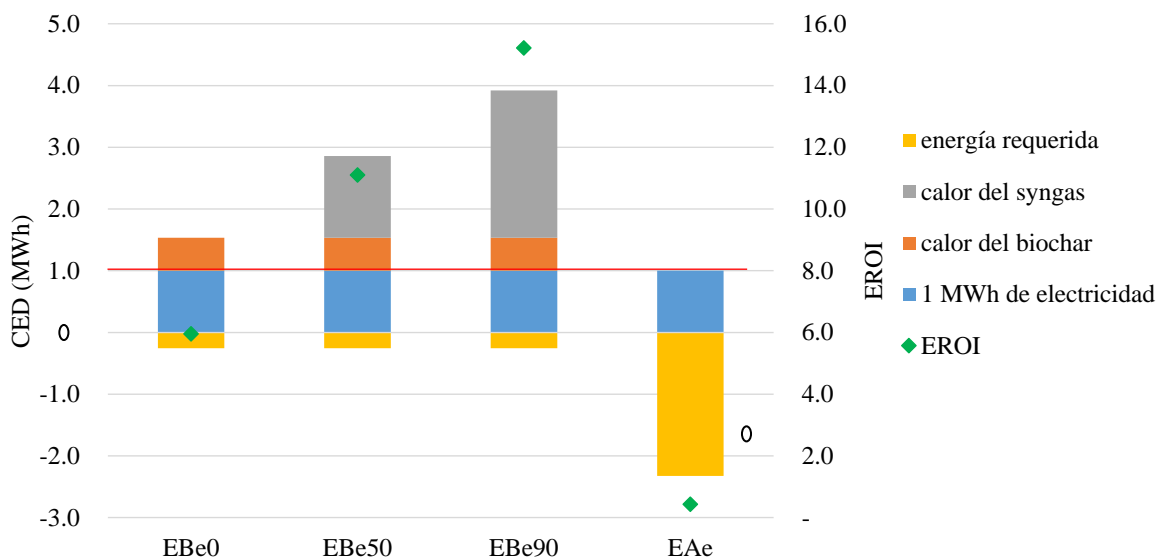


Figura 30: Resultado de demanda energética acumulada (CED) y EROI para todos los EBe y su contraste con el EAe. Los valores negativos representan la energía insumida por el sistema producto mientras que los valores positivos representan la energía generada. El EROI se calcula dividiendo los valores positivos sobre el valor absoluto de los negativos.

La figura 30 muestra el resultado de CED para los EBe y el EAe y en ella puede observarse que para cumplir con la UF el EAe requiere de más de 2 MWh dando un EROI de 0,4. Es decir que, por cada MWh de gasto energético, se producen 0,4 MWh. Por otra parte, los EBe al requerir tan poca energía por UF, presentan valores de EROI muy superiores (EBe0: 6; EBe50: 11,1; EBe90: 15,2).

### 3.2.2. Pellets para calefacción residencial

#### 3.2.2.1. Cambio climático (CC)

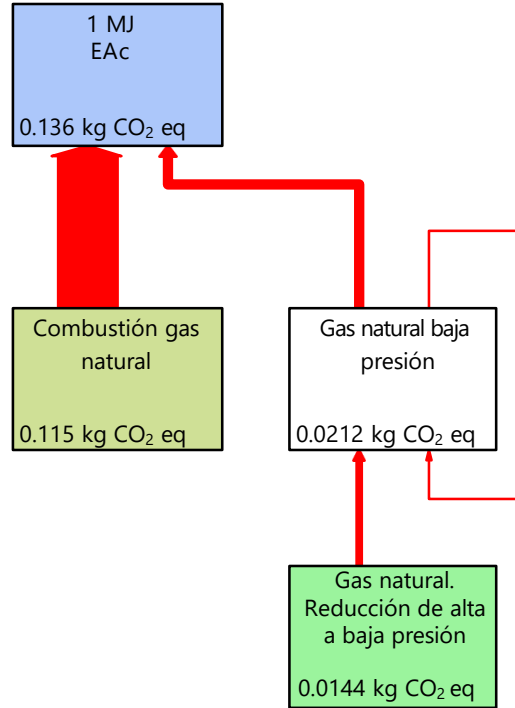


Figura 31: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el GWP para EAc (UF: entregar 1 MJ de calor útil para el sector residencial).

La figura 31 muestra el GWP del EAc donde se puede notar que cerca del 85% de las emisiones de GEI corresponden a la combustión *in situ* del gas natural. El 15% restante son las emisiones aguas arriba en los procesos de producción y distribución del gas natural. Estos valores se van a comparar con los obtenidos para el escenario de combustión de pellets de espartillo.

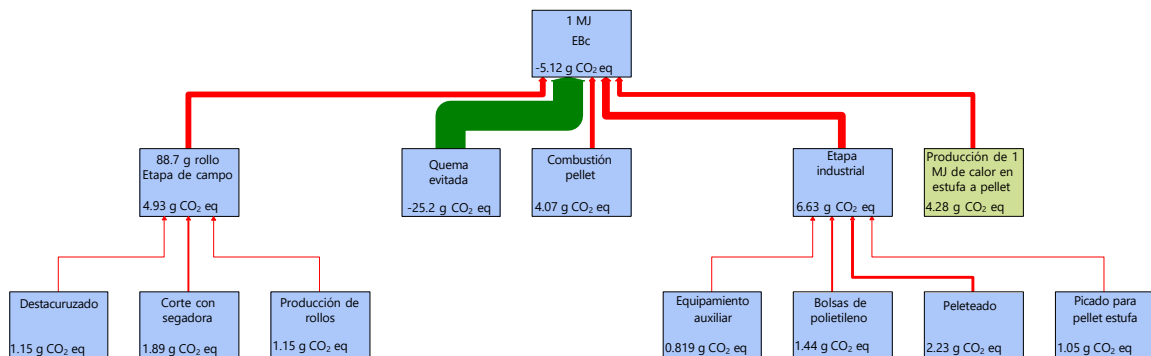


Figura 32: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el GWP para EBc.

La figura 32 muestra el GWP del EBc en el cual se observan repartidas las emisiones en cuatro procesos: etapa de campo (4,9 g de CO<sub>2</sub>eq por UF), etapa industrial (6,6 g de CO<sub>2</sub>eq por UF), las emisiones de GEI por la combustión *in situ* (4 g de CO<sub>2</sub>eq por UF) y las emisiones por la electricidad demandada por la estufa a pellets (4,2 g de CO<sub>2</sub>eq por UF). Las emisiones de correspondientes a las quemas evitadas son 25,2 g de CO<sub>2</sub>eq por UF, con lo cual el EBc resulta carbono negativo.

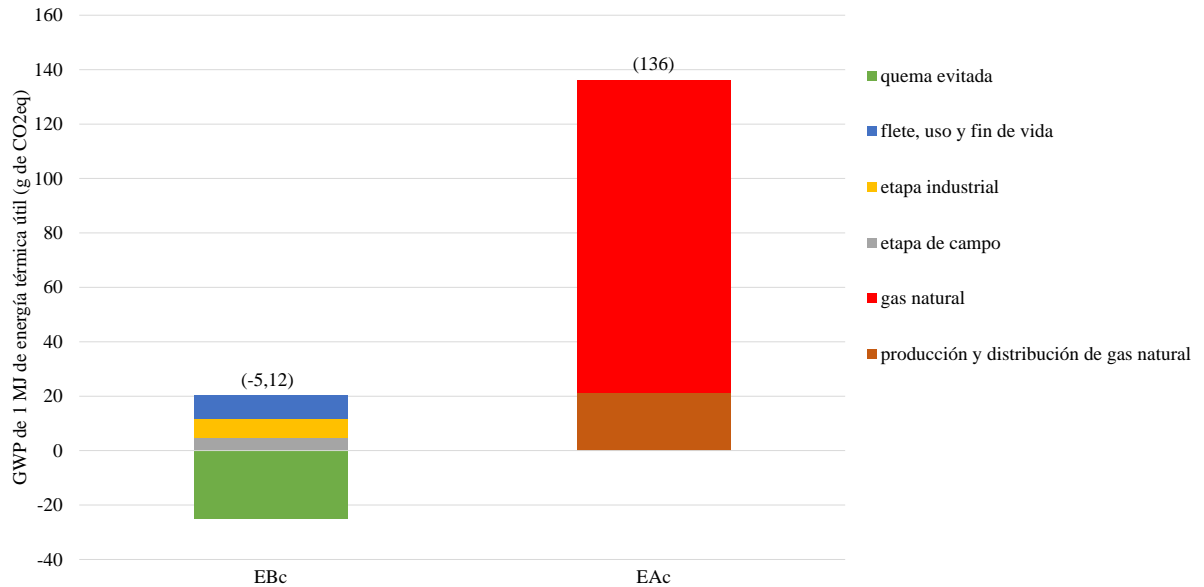


Figura 33: Resultado de GWP para EBc y EAc. Los números entre paréntesis indican el resultado de emisiones producidas – emisiones evitadas por UF para cada escenario.

La figura 33 compara las emisiones del EBc con las del EAc y de ella puede observarse el aporte de cada proceso al resultado global. Por cada MJ de calor útil entregado al sector residencial, el EBc sustrae de la atmósfera 5,12 g de CO<sub>2</sub>eq mientras que el EAc emite 136 g de CO<sub>2</sub>eq.

### 3.2.2.2. Uso de energía

Debido a que en la Argentina no se cuenta con datos de inventario para la producción de gas natural, para el EAc se considera el proceso de producción de gas natural Rest of the World (RoW).

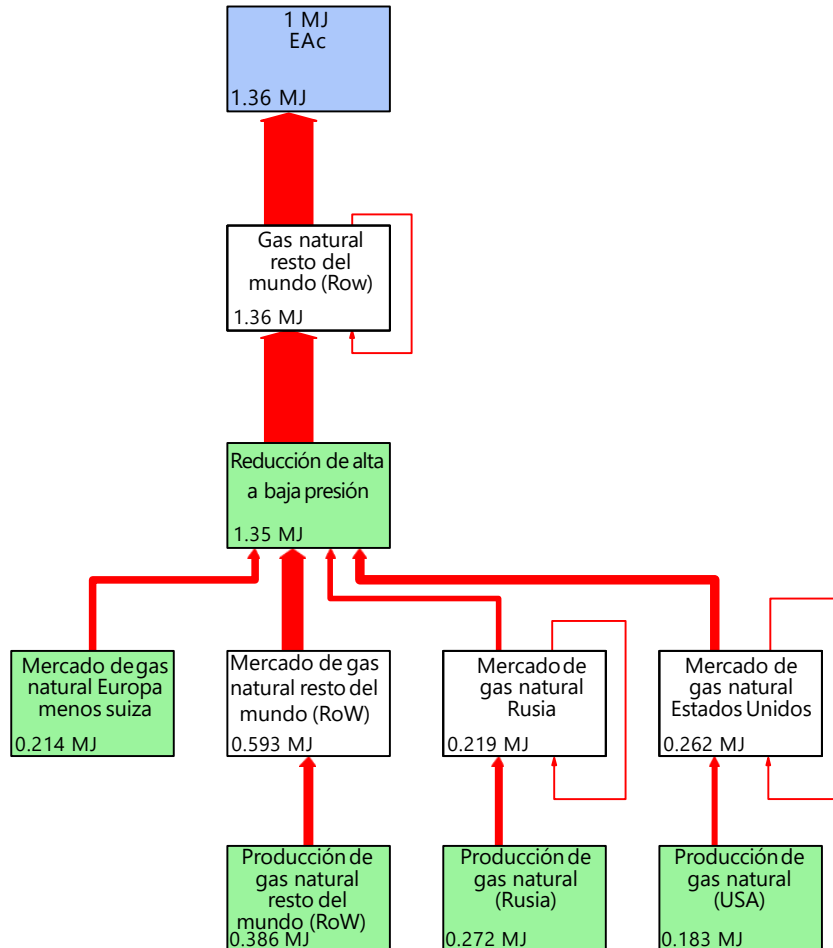


Figura 34: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para EAc. (UF: 1 MJ de calor térmico útil para el sector residencial).

El EAc presenta un CED de 1,36 MJ por UF en los procesos de producción y distribución de gas natural aguas arriba (figura 34). Se puede apreciar el aporte de las emisiones ponderadas de cada uno de los países que componen el *dataset*.

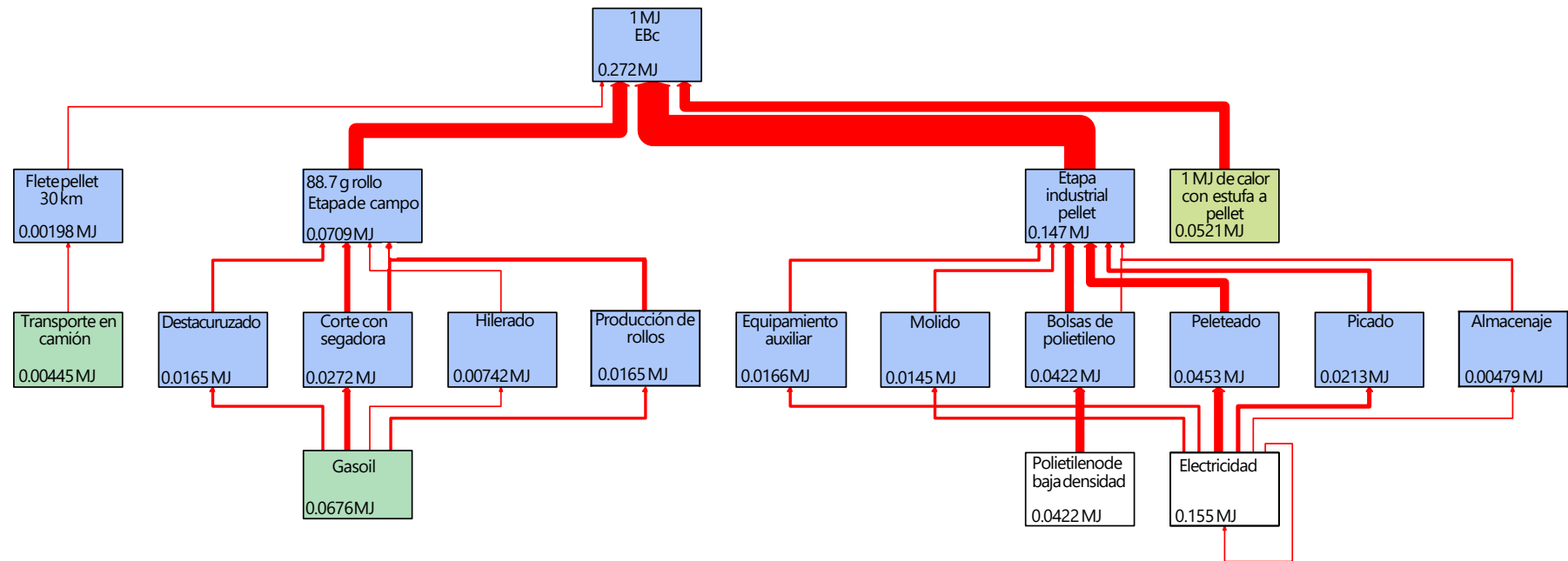


Figura 35: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para EBc. (UF: 1 MJ de calor térmico útil para el sector residencial).

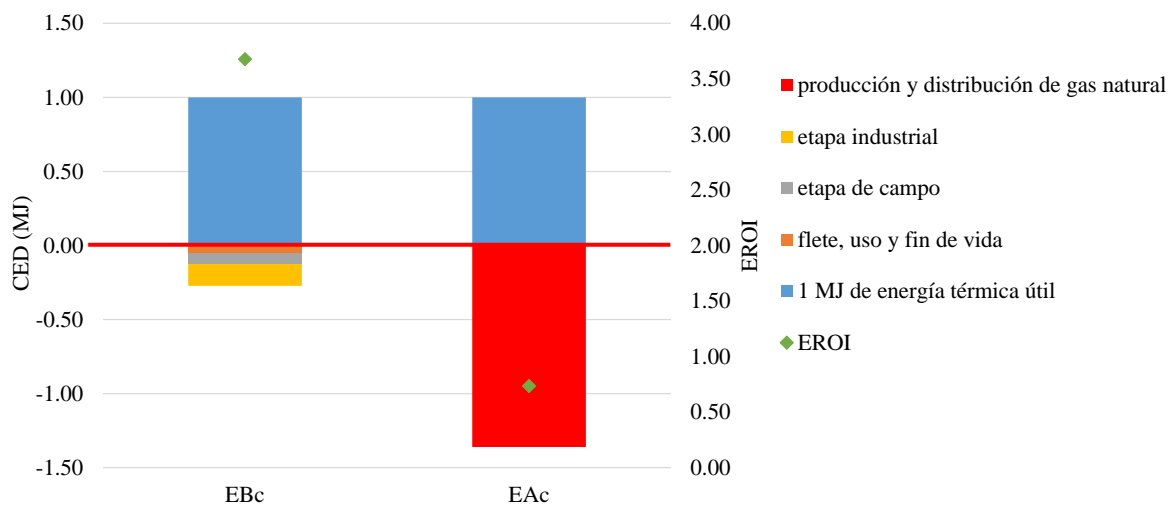


Figura 36: Resultado de CED y EROI para EBc y su contraste con el EAc. Los valores negativos representan la energía insumida por el sistema producto mientras que los valores positivos representan la energía generada. El EROI se calcula dividiendo los valores positivos sobre el valor absoluto de los negativos.

El desglose del CED del EBc se observa en la figura 35 en la que puede apreciarse un CED total de 0,272 MJ para cumplir con la UF. La mayor parte del uso de energía (54%) corresponde a la etapa industrial seguida por la etapa de campo (25,7%). En la figura 36 se resumen los aportes de cada proceso al CED. La figura 36 contrasta el CED de EBc con EAc y muestra el EROI resultante para cada escenario. Para el EBc se obtienen 3,68 MJ por cada MJ requerido por el sistema producto mientras que para el EAc solo se obtienen 0,74 MJ.

### 3.2.3. Bioetanol para el transporte

#### 3.2.3.1. Cambio climático (CC)

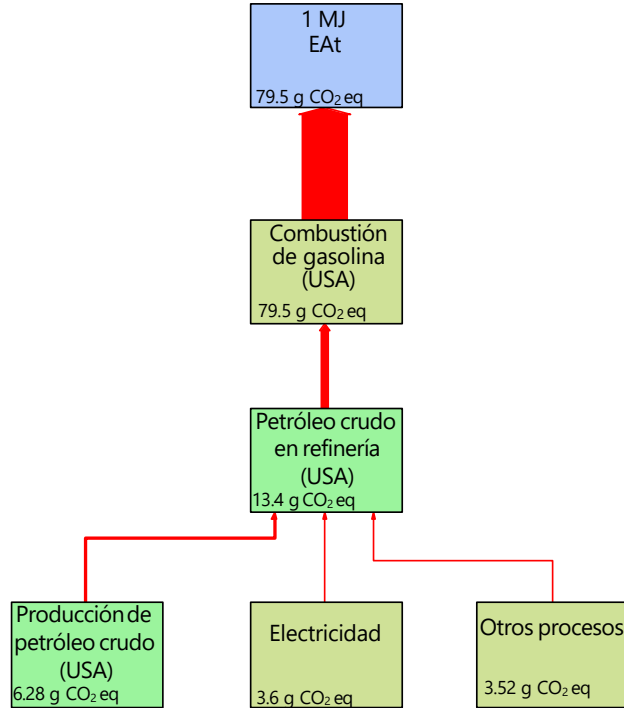


Figura 37: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el potencial de calentamiento global (GWP) para el escenario actual de transporte (EAt). UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.

La figura 37 muestra las emisiones de GEI para el EAt empleando datos de emisiones de la combustión de 1 MJ de nafta en Estados Unidos (NREL, 2003), por no tener datos de inventarios de la Argentina para este sistema producto. Por cada MJ de nafta se emiten 79,5 g de CO<sub>2</sub>eq.

Las figuras 38 y 39 muestran el desglose de las emisiones de GEI aportado por los distintos procesos del EBt considerando la biorefinería de Luo et al. (2009), con y sin autoabastecimiento de electricidad y calor a partir de la combustión de los residuos sólidos de la fermentación, respectivamente.

La figura 40 muestra las emisiones del EBt considerando para la biorefinería, el inventario propuesto por Jungbluth et al. (2007), mientras que los EBt con datos de Kumar y Murthy (2012) se pueden apreciar en las figuras 41 a 44, para cada uno de los cuatro pretratamientos

propuestos en esa referencia: ácido diluido, álcali, agua caliente y explosión de vapor, respectivamente.

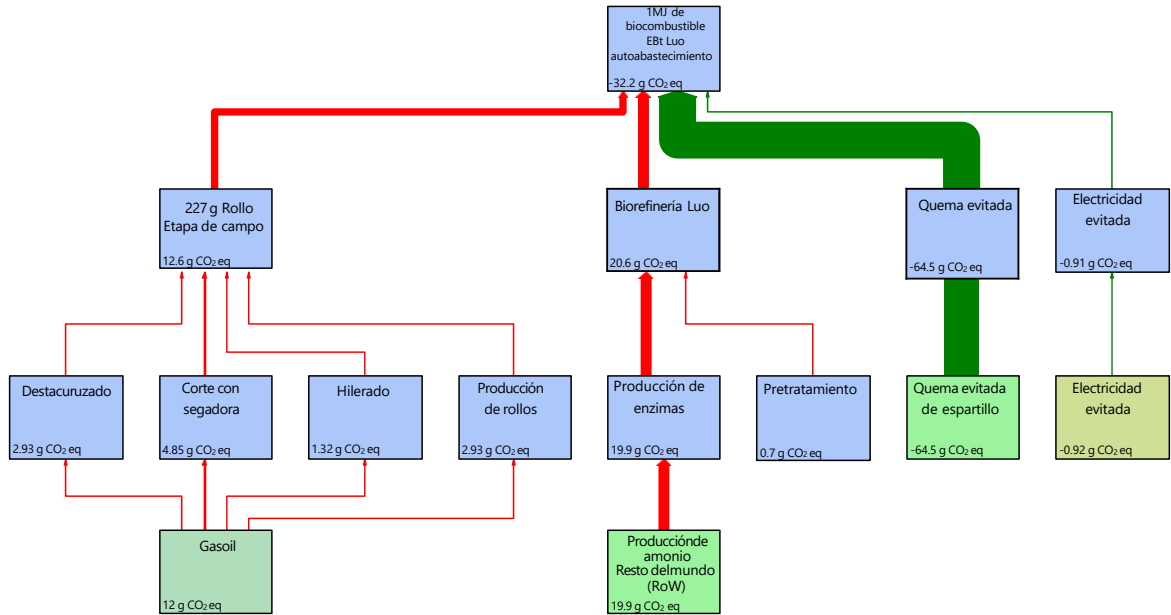


Figura 38: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el potencial de calentamiento global (GWP) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Luo et al. (2009). UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.

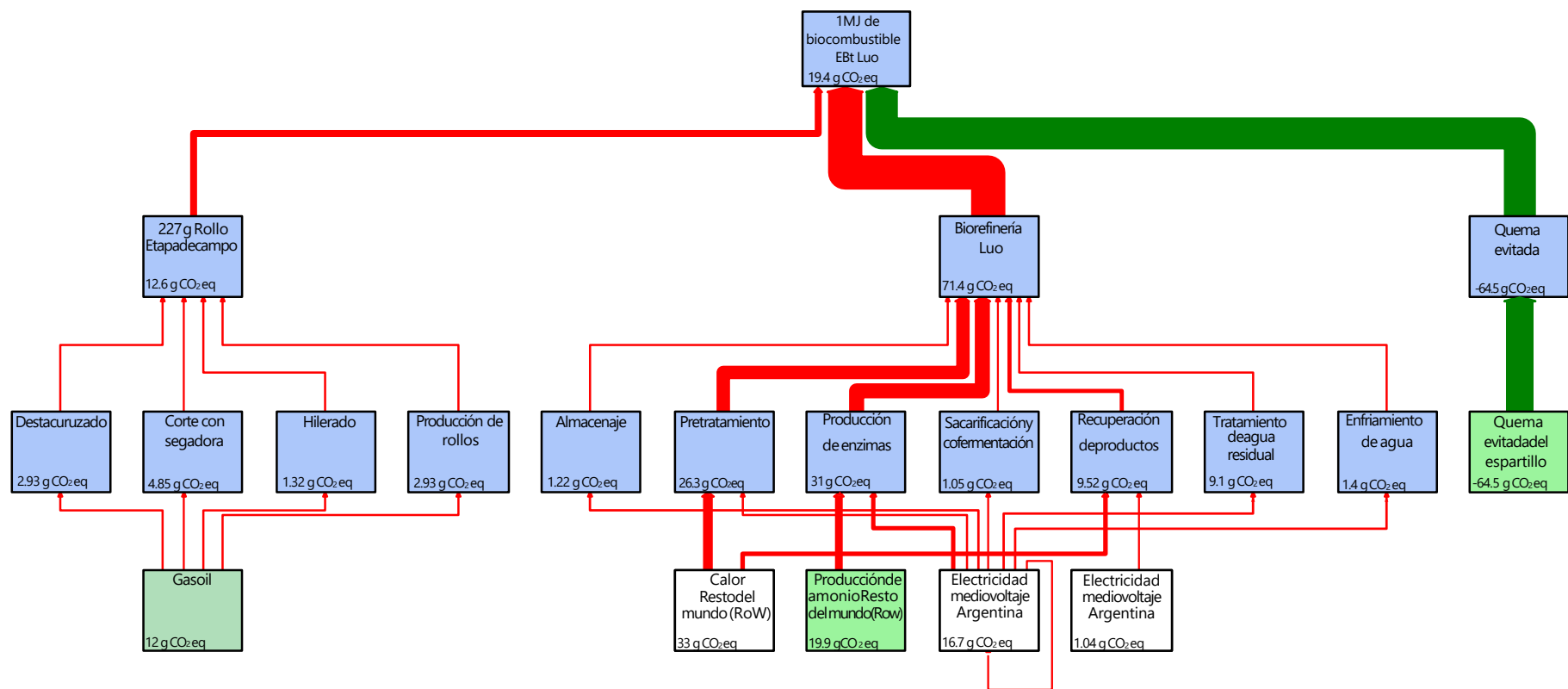


Figura 39: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el potencial de calentamiento global (GWP) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Luo et al. (2009) considerando autoabastecimiento energético. UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.

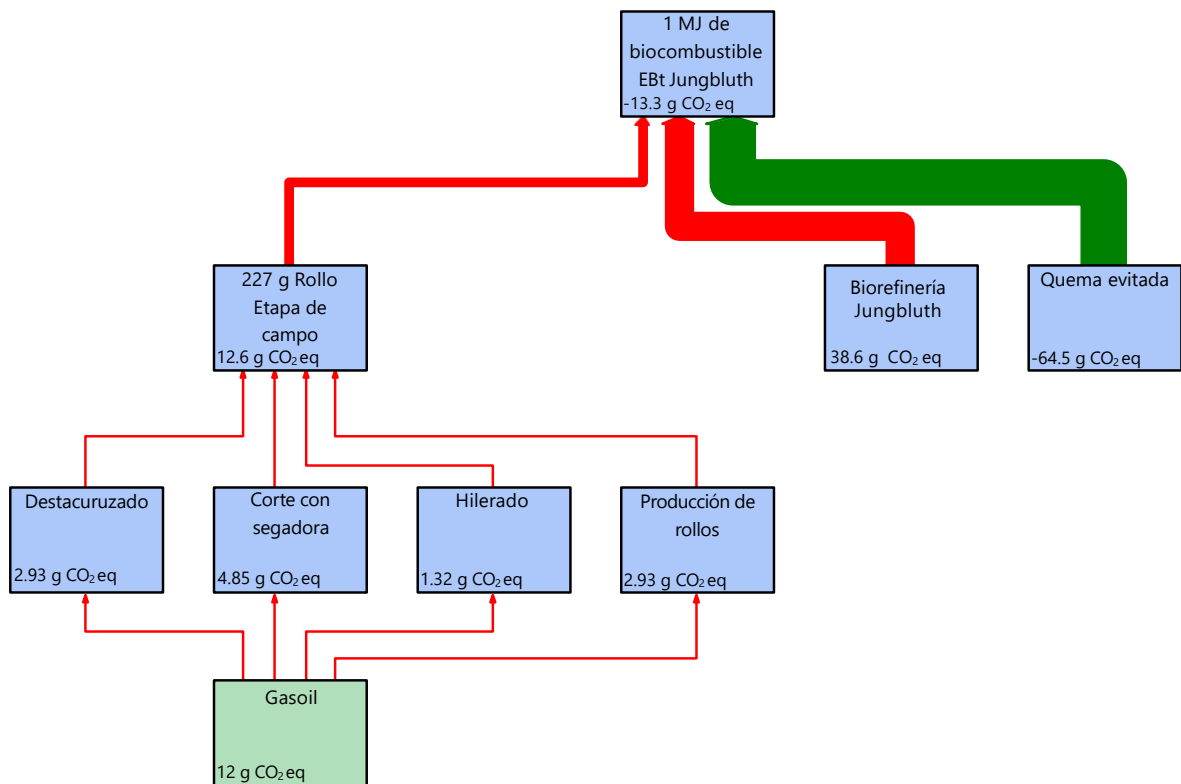


Figura 40: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el potencial de calentamiento global (GWP) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Jungbluth et al. (2007). UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.

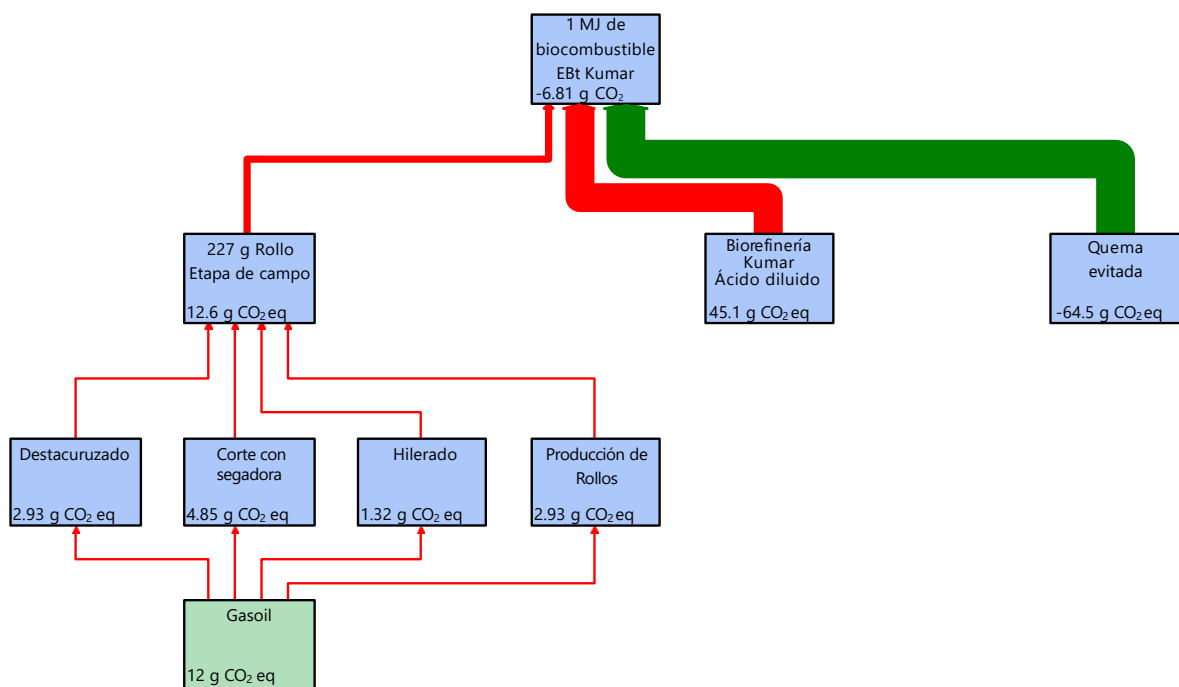


Figura 41: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el potencial de calentamiento global (GWP) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Kumar y Murthy (2012) (pretratamiento con ácido diluido). UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.

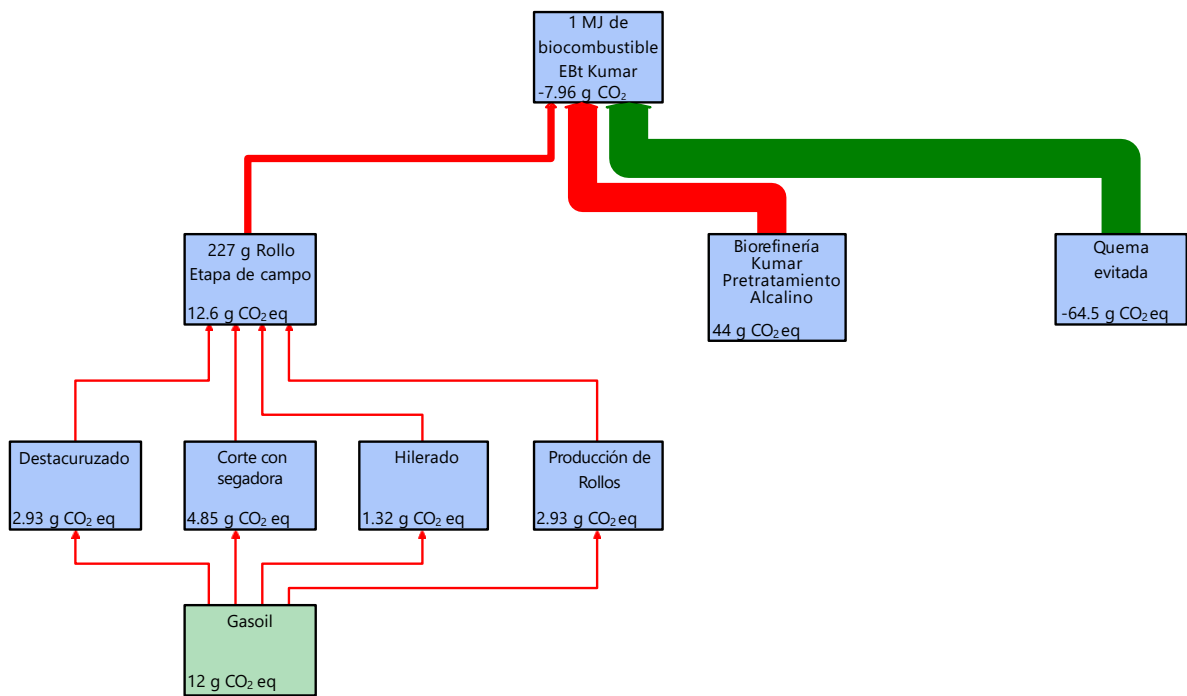


Figura 42: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el potencial de calentamiento global (GWP) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Kumar y Murthy (2012) (pretratamiento con álcali). UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.

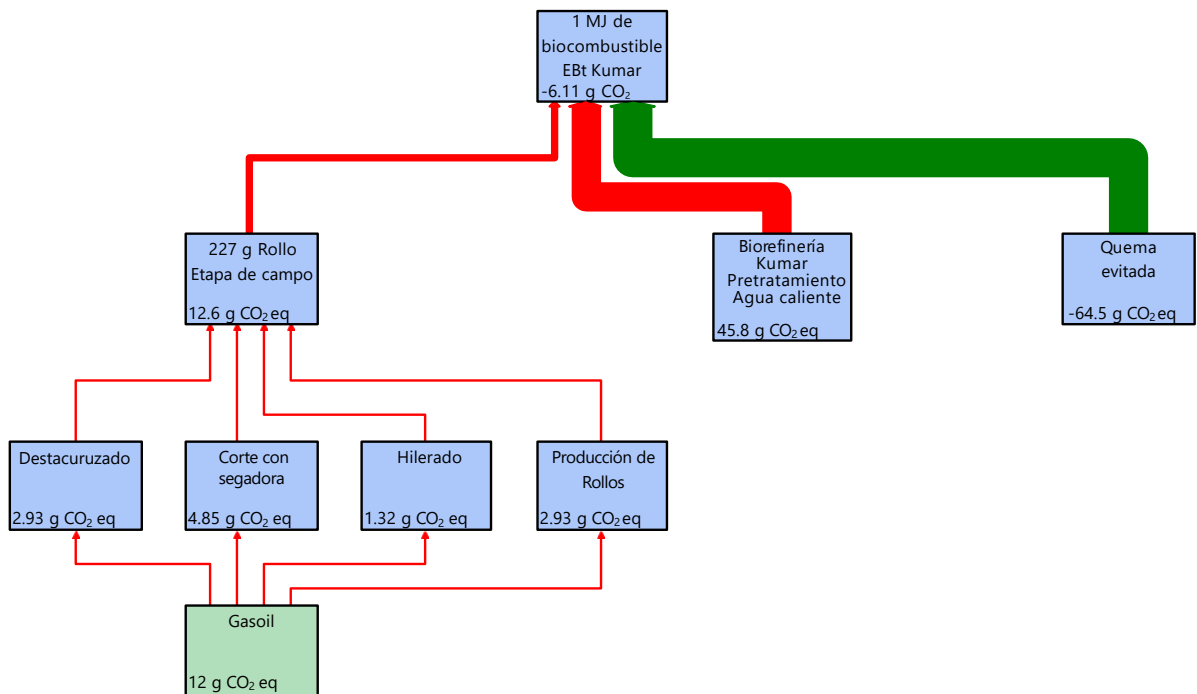


Figura 43: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el potencial de calentamiento global (GWP) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Kumar y Murthy (2012) (pretratamiento con agua caliente). UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.

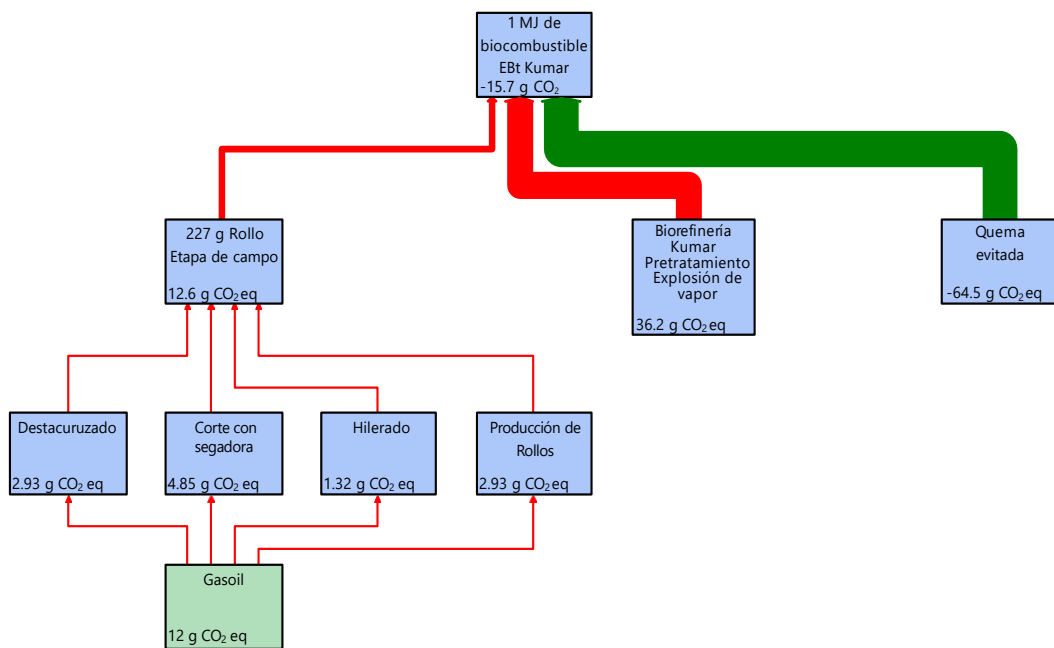


Figura 44: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando el potencial de calentamiento global (GWP) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Kumar y Murthy (2012) (pretratamiento con explosión de vapor). UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.

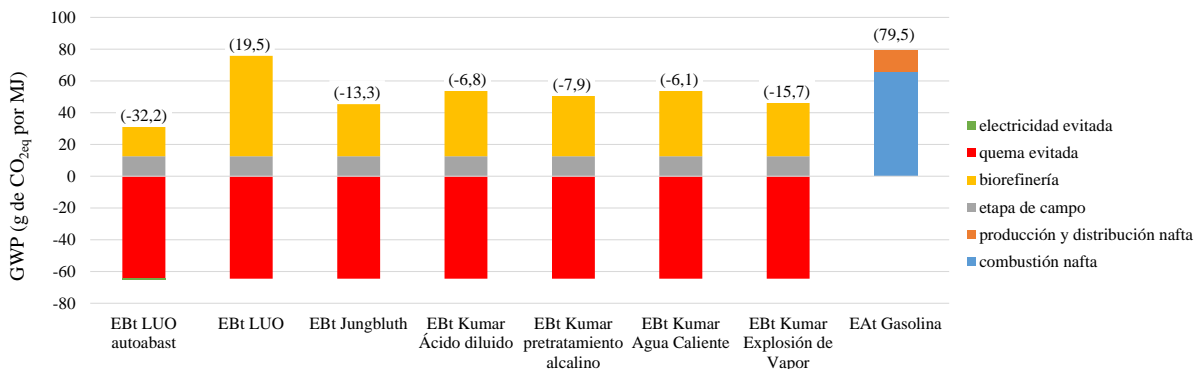


Figura 45: Resultado de GWP para EBt en base a diversas fuentes bibliográficas para los datos de biorefinería y EAt. Los números entre paréntesis indican el resultado de emisiones producidas – emisiones evitadas por UF para cada escenario.

La figura 45 resume las emisiones de los siete EBt y los contrasta con el EAt basado en nafta, con el *dataset* de Estados Unidos (NREL, 2003). El inventario de Luo et al. (2009) es el que mayor cantidad de energía requiere para la biorefinería. No obstante, el autor plantea que esos requerimientos (tanto de calor como de electricidad) podrían ser autoabastecidos por la combustión de los residuos sólidos de la biorefinería, por lo que resultaría el más favorable de los escenarios evaluados obteniéndose un balance de carbono negativos de 32,2 g de CO<sub>2</sub>e por MJ. Sin el autoabastecimiento, este sería el EBt de mayor cantidad de emisiones de GEI.

Los demás EBt son todos carbono negativo dado que las emisiones de CO<sub>2</sub>eq por las quemas evitadas son mayores a las emisiones generadas por los EBt.

### 3.2.3.2. Uso de energía

La figura 46 muestra la CED del EAt basado en nafta con datos de Estados Unidos (NREL, 2003). Por cada MJ de combustible, se requieren a lo largo del ciclo de vida, 1,21 MJ.

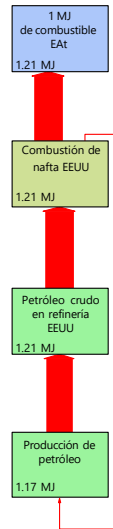


Figura 46: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para un escenario actual de transporte basado en nafta (EAt). UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.

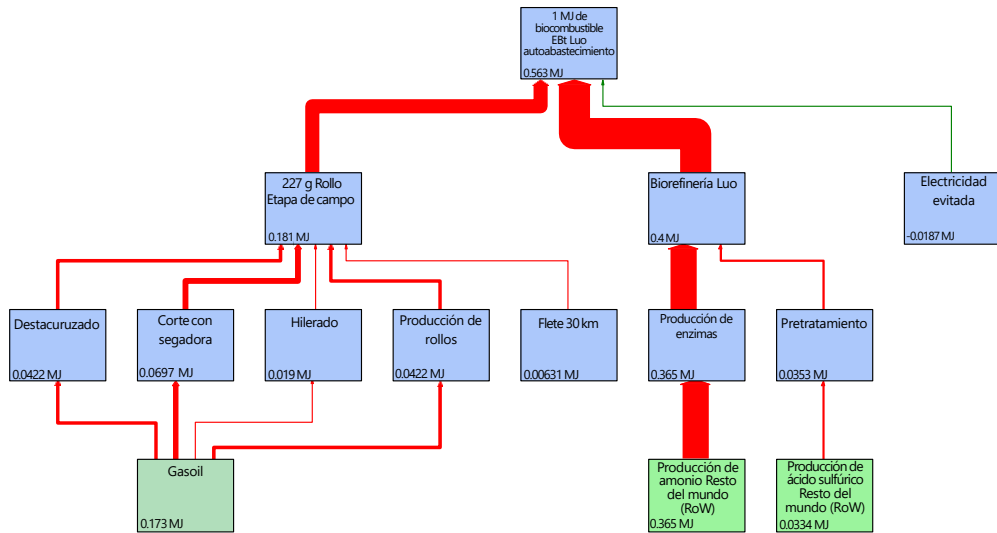


Figura 47: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Luo et al. (2009) con autoabastecimiento energético de la biorefinería. UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.

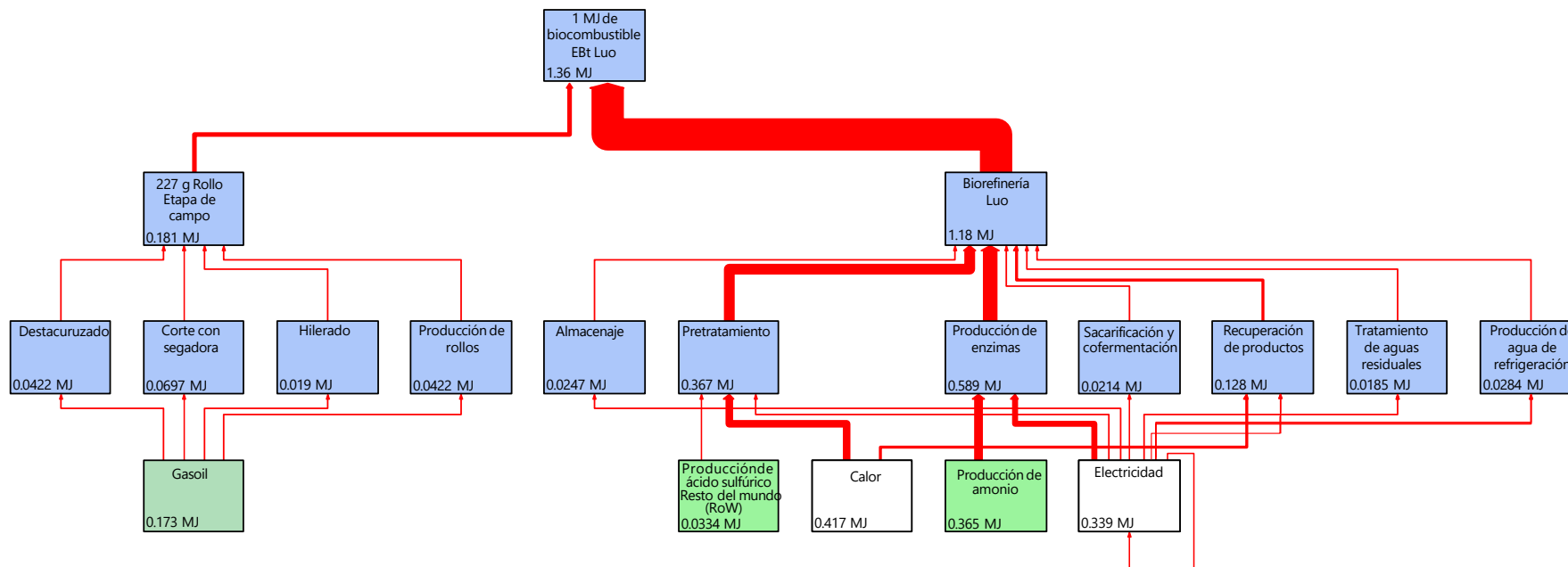


Figura 48: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Luo et al. (2009). UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.

Las figuras 47 y 48 muestran el CED del EBt con datos de Luo et al. (2009) con y sin autoabastecimiento energético, respectivamente. Al igual que para el GWP, se observa la importancia de poder autoabastecer los requerimientos de electricidad y calor de la biorefinería.

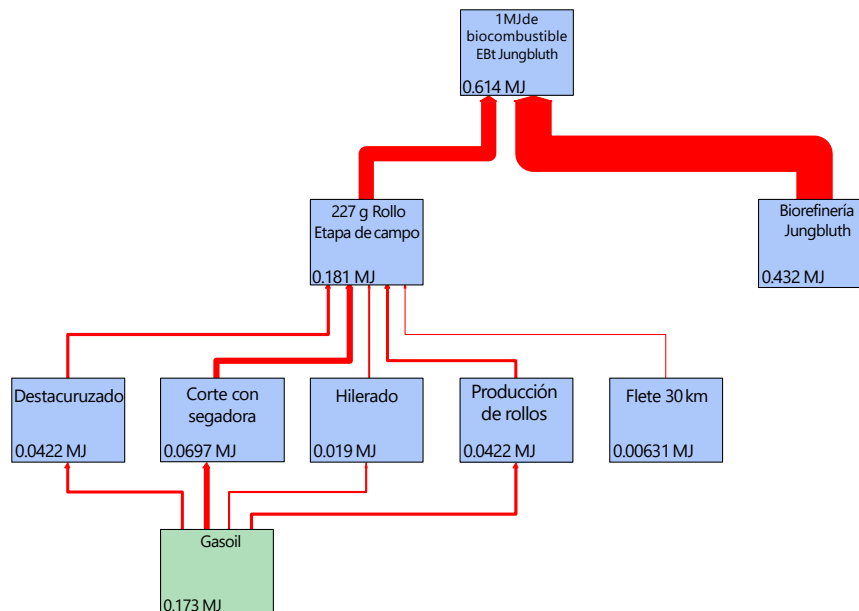


Figura 49: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Jungbluth et al. (2007). UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.

La figura 49 detalla el CED del EBt con datos de Jungbluth et al. (2007), donde la energía requerida por el sistema producto es de 0,61 MJ para cumplir con la UF. El 70% de la energía es requerida en la etapa industrial. Las figuras 50 a 53 muestran los EBt considerando los inventarios propuestos por Kumar y Murthy (2012) con pretratamientos ácido diluido, pretratamiento alcalino, agua caliente y explosión de vapor, respectivamente.

La figura 54 resume los resultados de CED y EROI de los siete EBt y el EAt mostrando la energía producida (UF) con valores positivos y la energía requerida por cada sistema producto con valores negativos. El resultado más favorable sería el de Luo et al. (2009), aunque hay que destacar que no se consideraron asignaciones ni expansión de sistema entre los subproductos de la fermentación (residuos sólidos) en los otros dos escenarios de biorefinería.

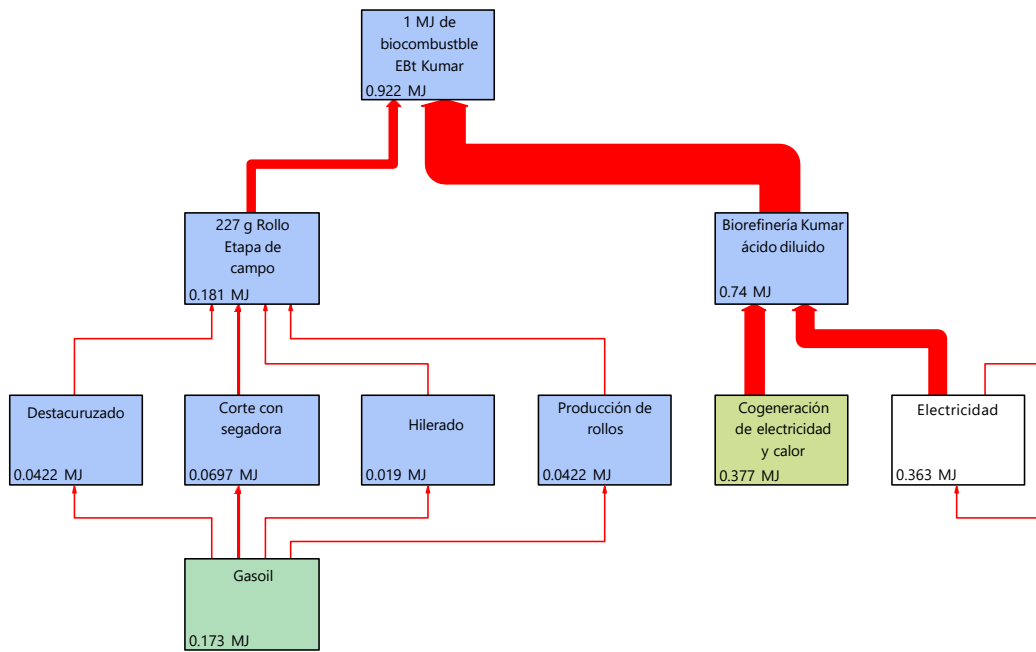


Figura 50: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Kumar y Murthy (2012); pretratamiento con ácido diluido. UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.

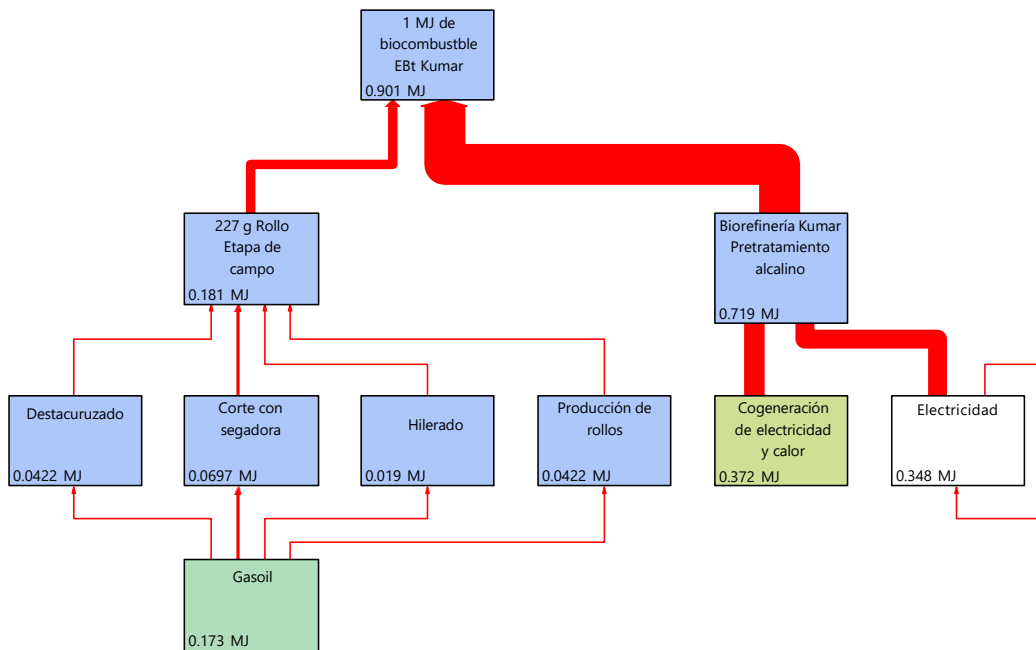


Figura 51: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Kumar y Murthy (2012); pretratamiento alcalino. UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.

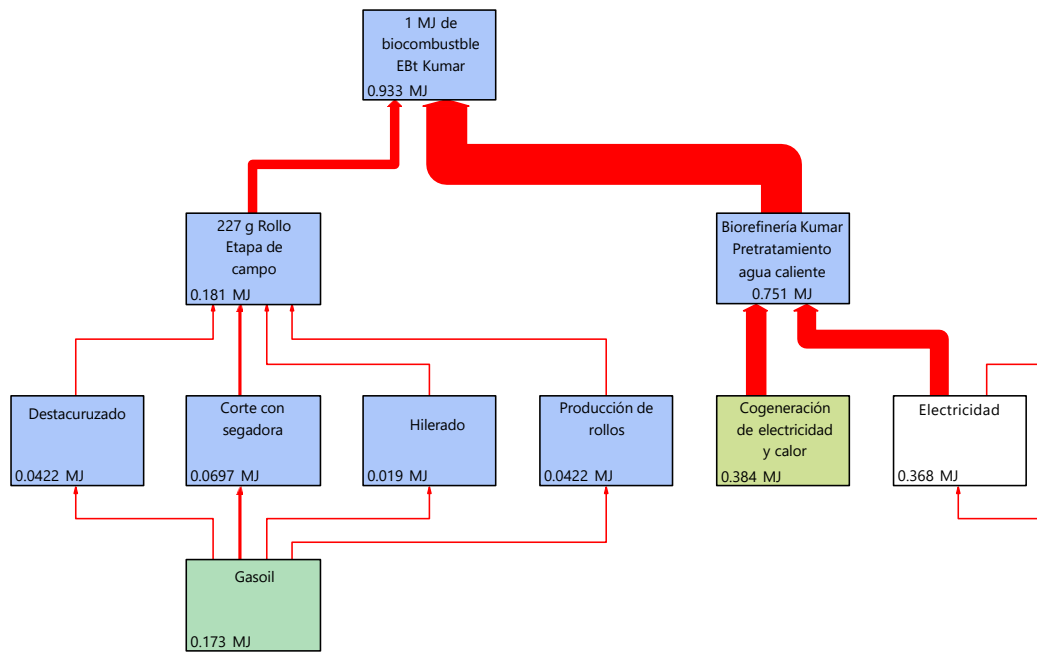


Figura 52: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Kumar y Murthy (2012); pretratamiento con agua caliente. UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.

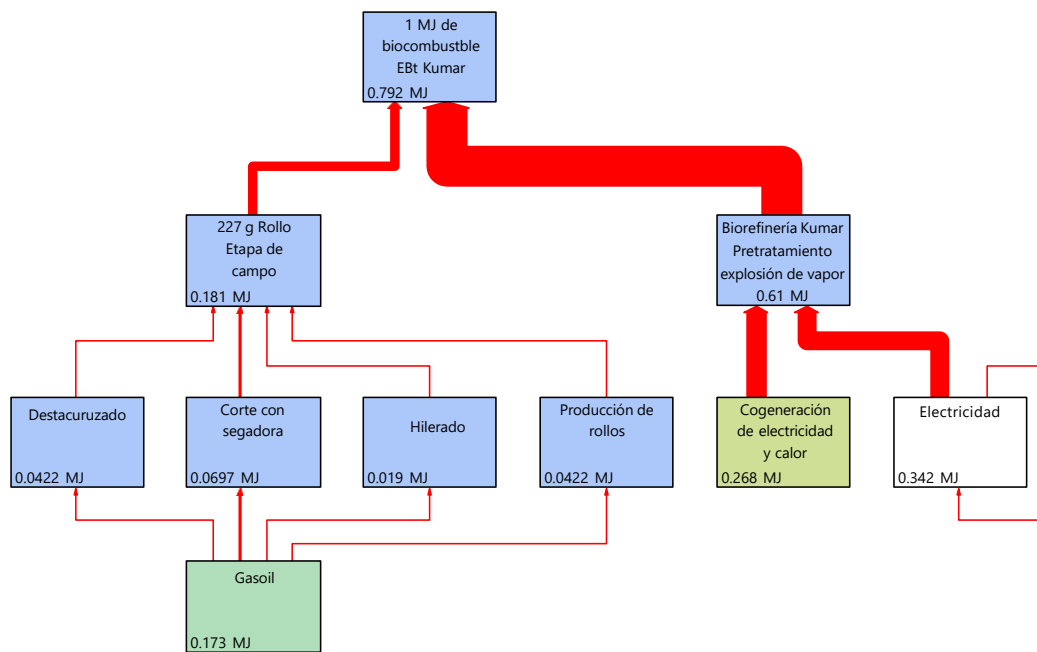


Figura 53: Diagrama de redes adaptado de SimaPro mostrando la demanda energética acumulada (CED) para el escenario bioenergético de transporte (EBt) empleando datos de biorefinería de Kumar y Murthy (2012); pretratamiento con explosión de vapor. UF: uso de 1 MJ de combustible líquido.

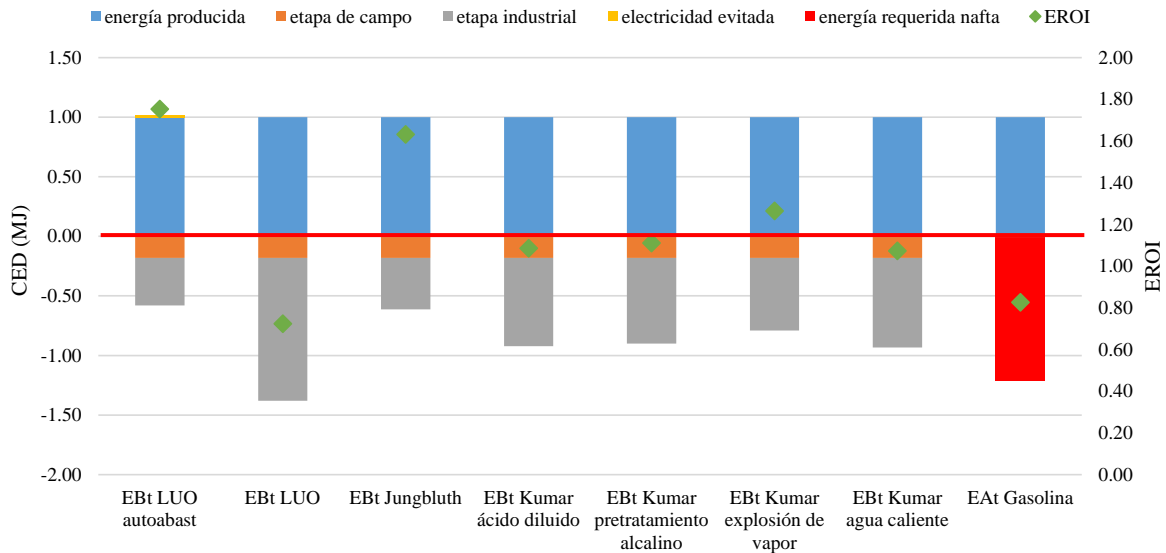


Figura 54: Resultado de CED y EROI para EBT y su contraste con el EAt. El EROI se calcula dividiendo los valores positivos (aquellos sobre la línea roja horizontal) dividido la energía requerida (barras debajo de la línea roja horizontal).

### 3.2.4. Resumen de la EICV

La tabla 9 resume los resultados de las dos categorías de impacto para todos los escenarios analizados. Para permitir comparaciones en esta tabla, se transformaron los escenarios de energía eléctrica de MWh a MJ.

	Cambio climático	Uso de energía	
	PCG (g de CO <sub>2</sub> eq*MJ <sup>-1</sup> )	CED (MJ)	EROI
EAe	114,40	2,32	0,43
EBe90	-232,50	-2,66	15,22
EBe50	-160,56	-1,60	11,10
EBe0	-70,56	-0,27	5,95
EAc	0,14	1,36	0,74
EBc	-5,12	0,27	3,68
EAt	79,50	1,21	0,80
EBt (rango)	(-32,2 a 19,5 )	0,56	(0,7 a 1,75)

Tabla 9: resumen de la EICV para todos los sistemas evaluados. Los datos de escenarios de electricidad están expresados en MJ para facilitar las comparaciones con los demás escenarios.

De la tabla se observa que el EBe90 es el de mejor desempeño para ambas categorías de impacto.

### 3.3. Estimación de biomasa

#### 3.3.1. Caracterización ambiental durante la cosecha

Las figuras 55 y 56 muestran el valor medio mensual de almacenaje de agua en el suelo y precipitaciones, respectivamente, en la estación meteorológica de El Trébol (32° 18' S 61° 40' O) y su comparación con la serie histórica. La primera cosecha (marzo de 2018) se realizó en condiciones de sequía con un valor mínimo histórico de almacenaje, levemente superior a los 110 mm como media mensual. Esta situación se revirtió con las precipitaciones otoñales, llegando a la primavera (segunda fecha de cosecha) con valores de almacenaje coincidentes con la mediana en el mes de septiembre de 2019. La última cosecha en Wildermuth se dio con una condición hídrica alta (almacenaje cercano al 3<sup>er</sup> cuartil). En el establecimiento privado, la cosecha primaveral de 2019 se dio con un almacenaje ubicado dentro de valores cercanos a la mediana, mientras que en 2020 las condiciones de agua fueron menores al 1<sup>er</sup> cuartil.

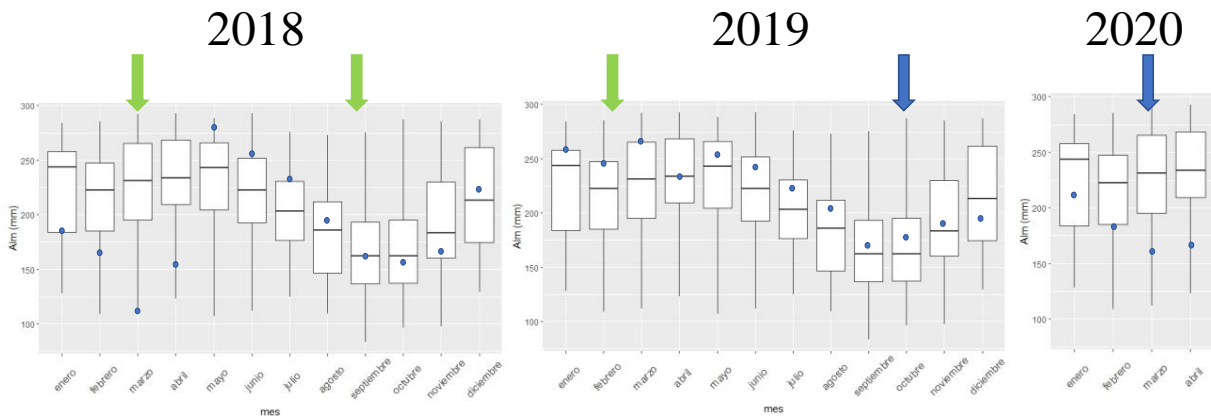


Figura 55: Almacenaje de agua en el suelo en función de la serie histórica de El Trébol (1991 hasta 2020). Las flechas verdes indican los momentos de cosecha en Wildermuth y las azules en el establecimiento privado. Los puntos azules indican la situación de cada año facilitando la comparación con la serie histórica.

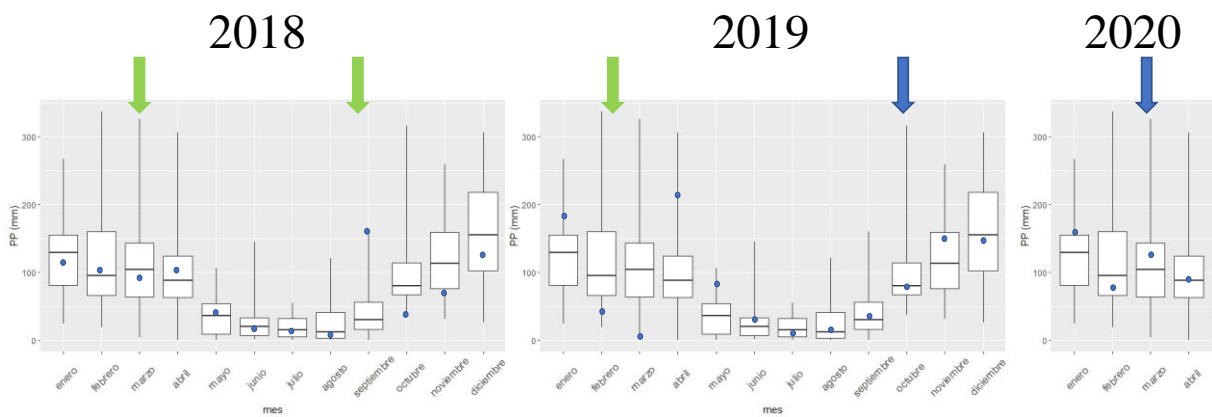


Figura 56: Precipitaciones en función de la serie histórica de El Trébol (1991 hasta 2020). Las flechas verdes indican los momentos de cosecha en Wildermuth y las azules en el establecimiento privado. Los puntos azules indican la situación de cada año facilitando la comparación con la serie histórica.

Las figuras 57 y 58 muestran la situación ambiental respecto a la serie histórica de las temperaturas máximas y mínimas, respectivamente. La primera cosecha (marzo de 2018) se realizó en condiciones de altas temperaturas respecto a la media histórica. Estas altas temperaturas prevalecieron hasta la segunda cosecha con excepción de las máximas del mes de septiembre. La cosecha de febrero de 2019 también fue en condiciones de alta temperatura en relación a la media histórica. Las temperaturas del invierno de 2019 fueron bajas. En septiembre de este año se alcanzaron altas temperaturas máximas (25 °C de promedio) y octubre (mes de cosecha en el establecimiento privado) transcurrió en condiciones normales para la época del año. El primer trimestre de 2020 registró temperaturas normales para esa época del año.

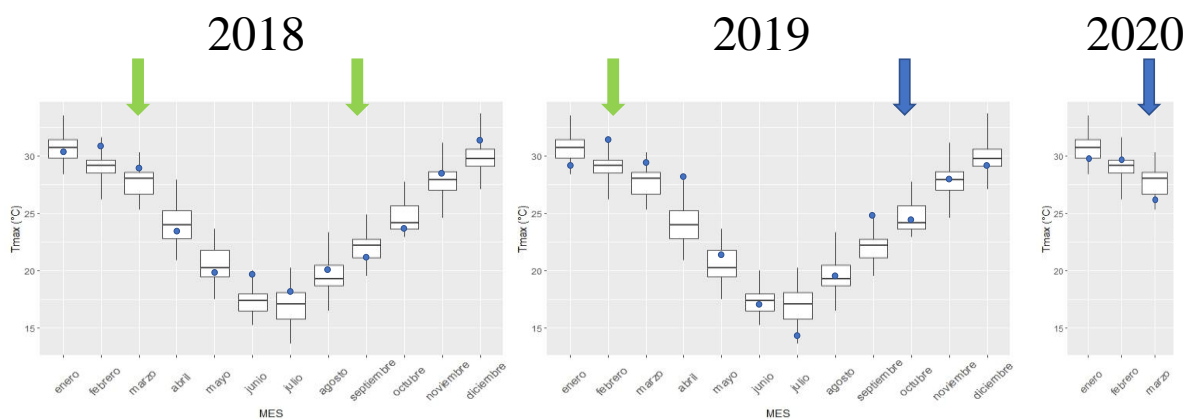


Figura 57: Temperatura máximas en función de la serie histórica de El Trébol (1991 hasta 2020). Las flechas verdes indican los momentos de cosecha en Wildermuth y las azules en el establecimiento privado. Los puntos azules indican la situación de cada año facilitando la comparación con la serie histórica.

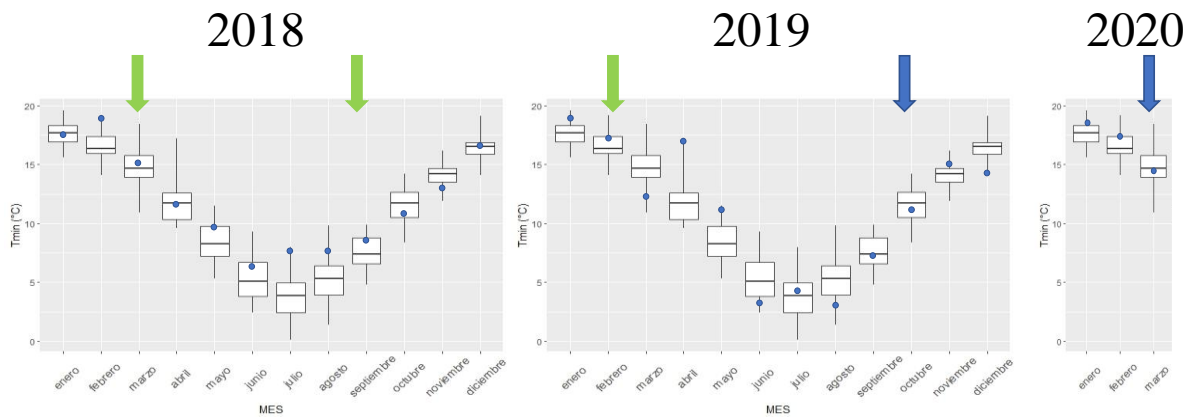


Figura 58: Temperaturas mínimas en función de la serie histórica de El Trébol (1991 hasta 2020). Las flechas verdes indican los momentos de cosecha en Wildermuth y las azules en el establecimiento privado. Los puntos azules indican la situación de cada año facilitando la comparación con la serie histórica.

### 3.3.2. Modelos predictivos de biomasa cuantitativos y cualitativos

Las fracciones de biomasa cosechada en las cinco fechas de cosecha pueden observarse en la figura 59. Se observa con claridad que, en la estación primaveral, la biomasa verde presenta valores más bajos en relación a la biomasa total al compararlos con la estación otoñal.

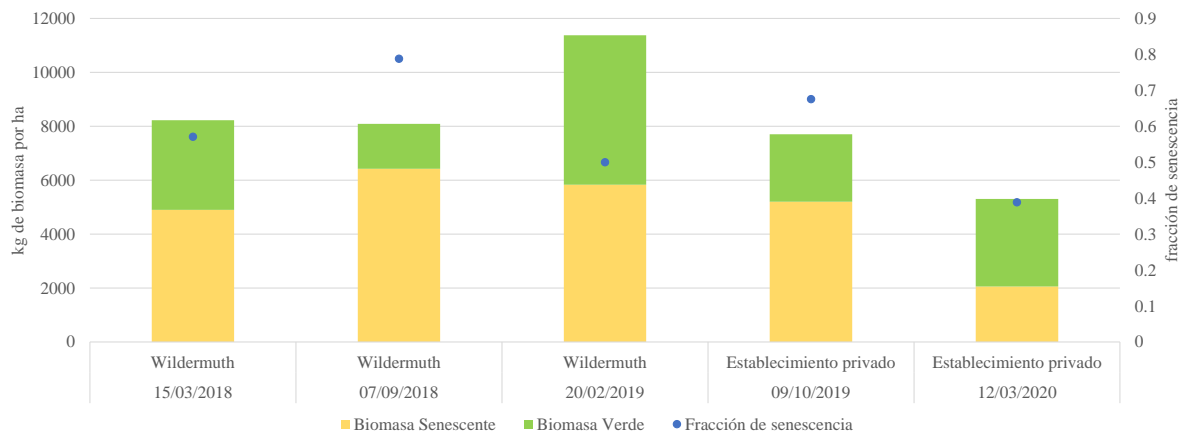


Figura 59: Fracciones de biomasa de *S. argentinensis* para las cinco fechas de cosecha en los dos sitios

Las variables explicativas seleccionadas por cada modelo pueden observarse en la tabla 10.

	Estación (variable dummy)	Sitio (Variable dummy)	Banda verde	Banda roja	Banda borde rojo	Banda NIR	NDWI	OSAVI
Biomasa total con sitio	X	X	X	X	X	X	X	X
Biomasa total sin sitio	X		X	X		X	X	X
Biomasa verde con sitio	X	X	X	X	X		X	X
Biomasa verde sin sitio	X		X	X		X	X	X
Biomasa senescente con sitio	X	X	X			X	X	
Biomasa senescente sin sitio	X		X	X	X	X	X	X
Modelo cualitativo Random Forest	X		X	X	X	X	X	X

Tabla 10: variables empleadas por cada modelo

La figura 60 muestra las regresiones de los modelos predictivos cuantitativos con y sin la inclusión del sitio como variable cualitativa. Debido a que el  $R^2$  baja entre 0,15 y 0,25 al sacar el sitio, ya sea por el tipo de suelo o por las condiciones meteorológicas acontecidas próximas a las fechas de cosecha, éste explica entre un 15 y 25% de la variabilidad de las distintas fracciones de biomasa.

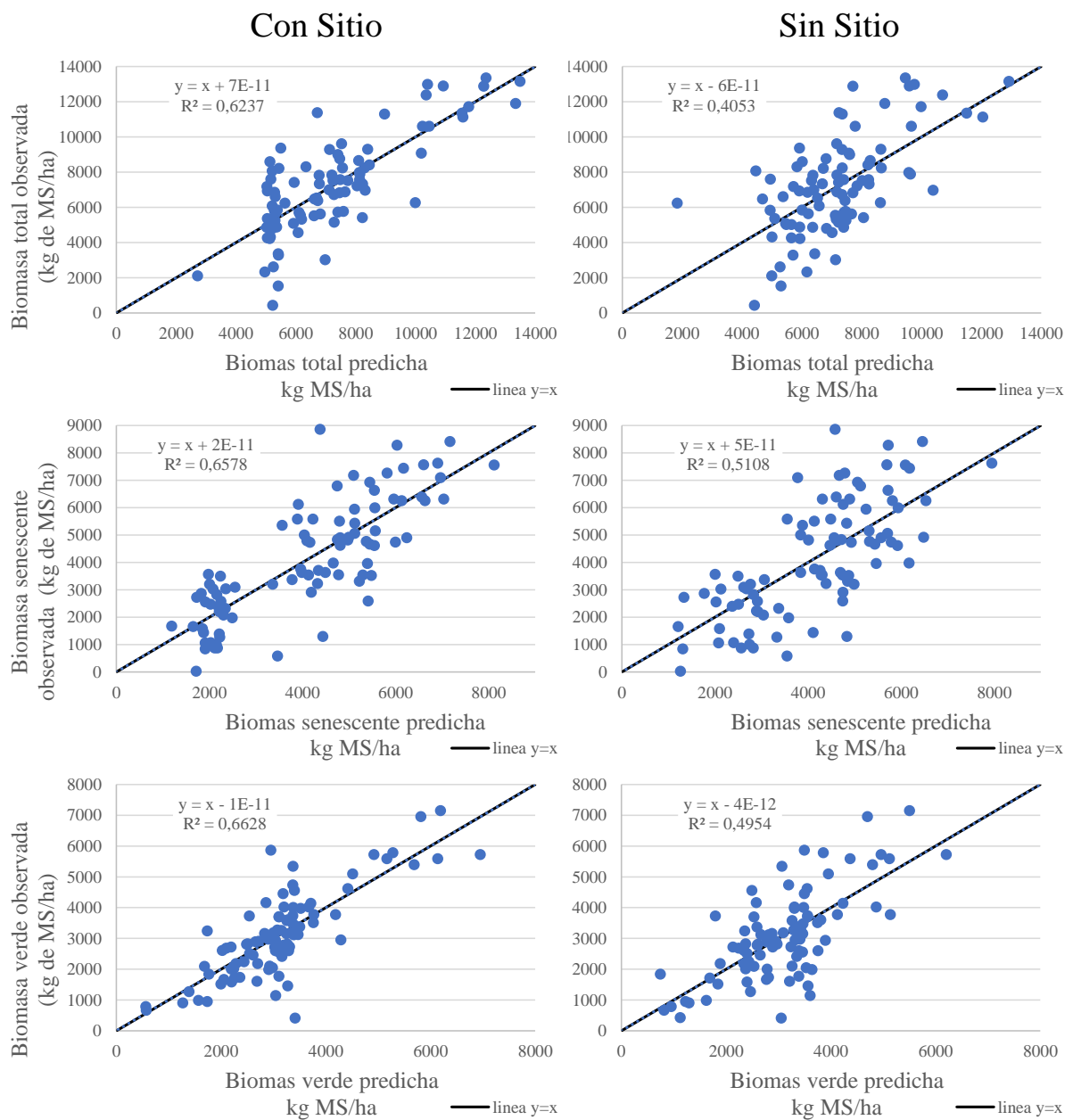


Figura 60: Modelos predictivos de biomasa total, senescente y verde con la inclusión del sitio como variable cualitativa (izquierda) y sin la inclusión del sitio (derecha)

Los estimadores del desempeño de los seis modelos se pueden observar en la tabla 11. En todos ellos se observa que la presencia del sitio como variable cualitativa mejora el desempeño de los modelos. Las clasificaciones en función de cada índice de desempeño se realizó en función de clasificaciones realizadas por otros autores (Parajuli et al., 2009; He et al., 2019).

sitio	Fracción de biomasa	R2		NRMSE		EF		d	
		valor	clasificación	valor	clasificación	valor	clasificación	valor	clasificación
con sitio	Biomasa total	0,62	bueno	0,24	regular	0,62	bueno	0,87	bueno
	Biomasa senescente	0,66	bueno	0,3	regular	0,66	bueno	0,89	bueno
	Biomasa verde	0,66	bueno	0,27	regular	0,66	bueno	0,89	bueno
sin sitio	Biomasa total	0,41	regular	0,3	regular	0,41	regular	0,74	regular
	Biomasa senescente	0,51	bueno	0,36	malo	0,51	bueno	0,81	bueno
	Biomasa verde	0,5	bueno	0,33	malo	0,5	bueno	0,81	bueno

Tabla 11: Indicadores de desempeño de los modelos predictivos de biomasa.

En la figura 61 se observa el resultado del modelo cualitativo para la fecha 9 de octubre de 2019. El modelo cualitativo pudo predecir correctamente las 90 muestras. Debido a que las variables explicativas se obtuvieron con una resolución espacial mayor a las de la zona de muestreo (pixel de 8x8 cm vs círculo de 1 m<sup>2</sup>, respectivamente), se puede observar para las 3 muestras ampliadas en la figura 61 en las cuales la biomasa total estaba dentro del grupo 3 (entre 6951 y 8545 kg por ha), los valores predichos por el modelo cualitativo en cada uno de los pixels que componen cada muestra.

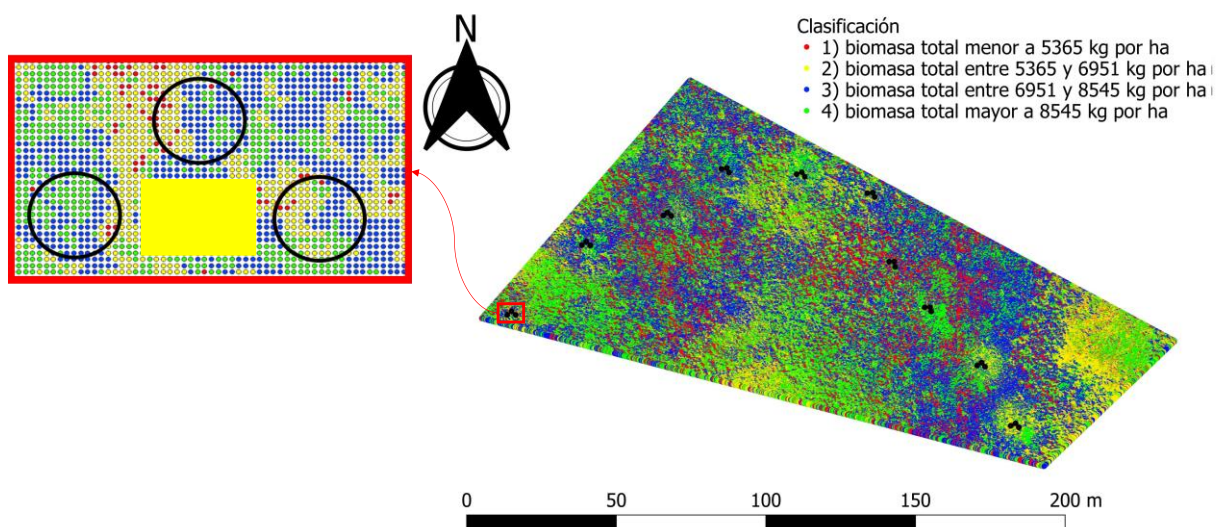


Figura 61: Resultado del modelo cualitativo corrido en pixels de 8 cm en el que se observan delimitadas en círculos negros las 30 muestras. A la izquierda se pueden apreciar 3 muestras cuya clasificación es 3 (Azul).

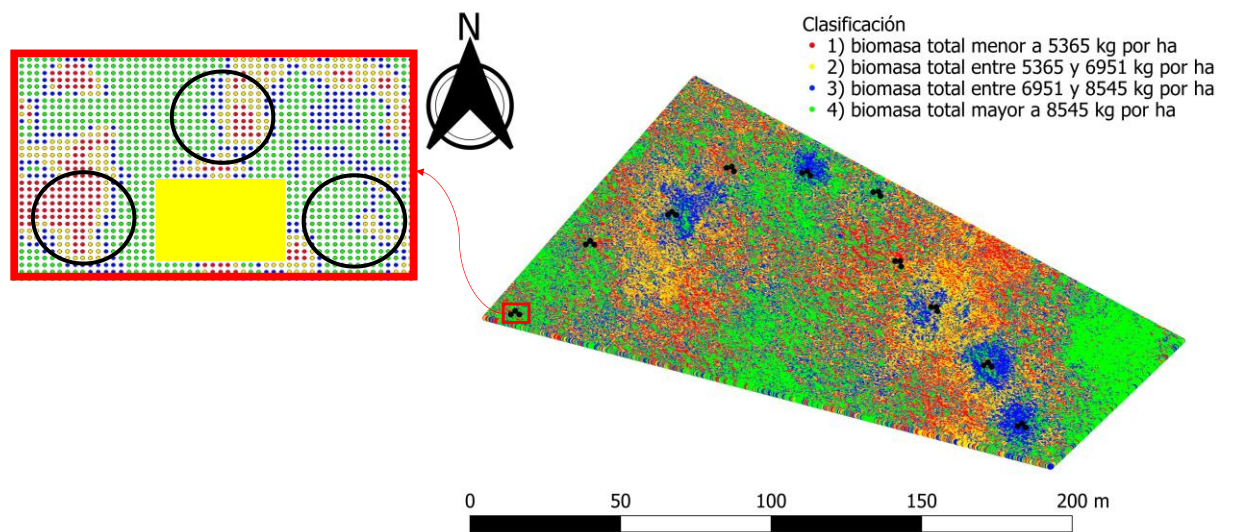


Figura 62: Resultado del modelo cuantitativo sin sitio corrido en pixels de 8 cm en el que se observan delimitadas en círculos negros las 30 muestras. A la izquierda se pueden apreciar 3 muestras cuya clasificación es 3 (Azul).

En la figura 62 se analiza de forma análoga al modelo cualitativo, el polígono con las mismas muestras que en la figura 61. Al ampliar las mismas tres muestras, se puede apreciar que el nivel de acierto es menor en este modelo lo que resulta consistente debido al bajo  $R^2$  de dicho modelo. No obstante, resulta notable que ambos modelos delimitaron de manera similar las zonas con mayor cantidad de biomasa (aquellas zonas de color verde).

### 3.3.3. Caracterización de la firma espectral

#### 3.3.3.1. Efecto estacional

La estación del año diferencia claramente las firmas espectrales, tal como puede observarse en la figura 63. Se ve un aumento notable en la reflectancia en el NIR y en el borde rojo tanto con el dron como con el ESP, siendo mayor los valores observados en marzo. Los valores también aumentan en el sector del verde mientras que lo contrario sucede en el rojo. En el NIR el dron mostró valores superiores de reflectancia que el ESP para ambas estaciones. Esta mayor reflectancia en el NIR del dron se observó en todas las situaciones que se muestran en las figuras 63 a 65.

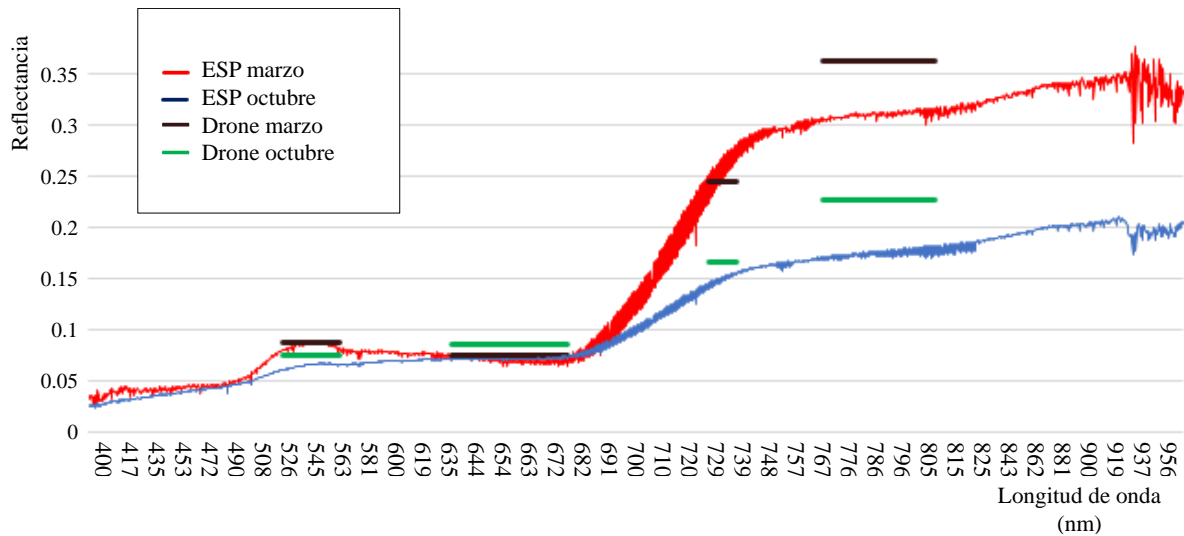


Figura 63: Firmas espectrales del espartillo en marzo (curva roja y línea negra) y octubre (curva azul y línea verde).

### 3.3.3.2. Efecto del grado de senescencia

La figura 64 muestra el efecto del nivel de senescencia sobre la firma espectral. Como es de esperar, a menor nivel de senescencia, mayor será la reflectancia en longitudes de onda del verde. El comportamiento en el rango rojo difirió entre instrumentos de medición: el dron registró mayor reflectancia asociada a la alta senescencia, mientras que el ESP mostró en orden creciente de reflectancia, al nivel de senescencia alta, baja y media. En el borde rojo y en el NIR ambos instrumentos registraron mayor reflectancia con baja senescencia mientras que el mínimo de reflectancia se dio con senescencia media.

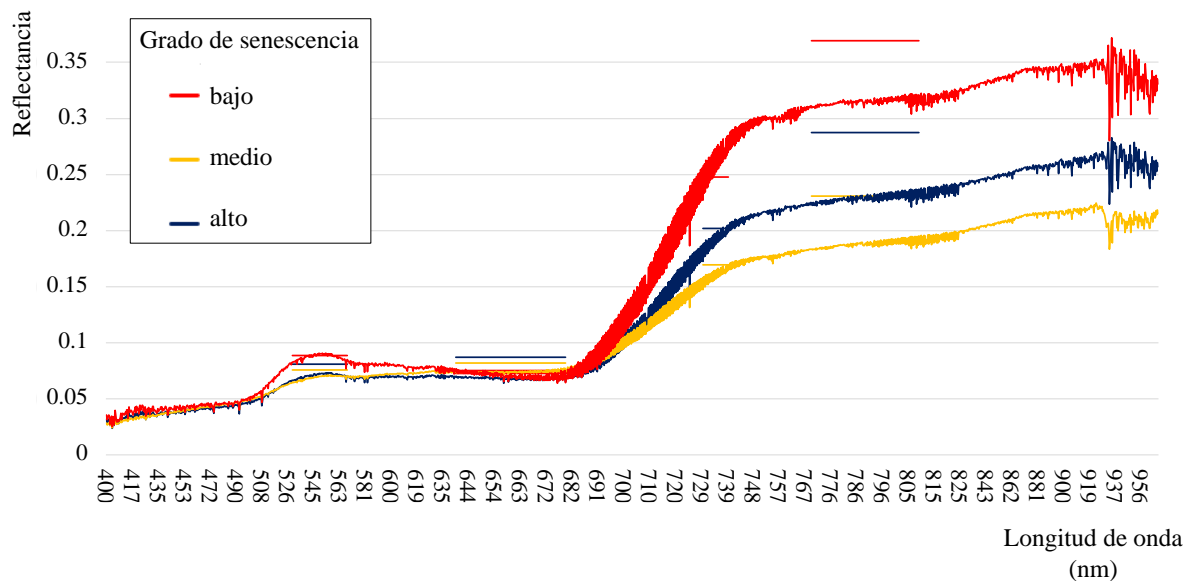


Figura 64: Firmas espectrales del espartillo separado en tres grupos de 20 muestras cada uno en función del grado de senescencia.

### 3.3.3.3. Firmas espectrales en función de la cantidad de biomasa

Al realizar un ranking de biomasa separando a las 60 muestras en 4 grupos de 15 muestras cada una, se puede observar una relación inversa entre la reflectancia y la biomasa en el NIR y en el borde rojo (figura 65).

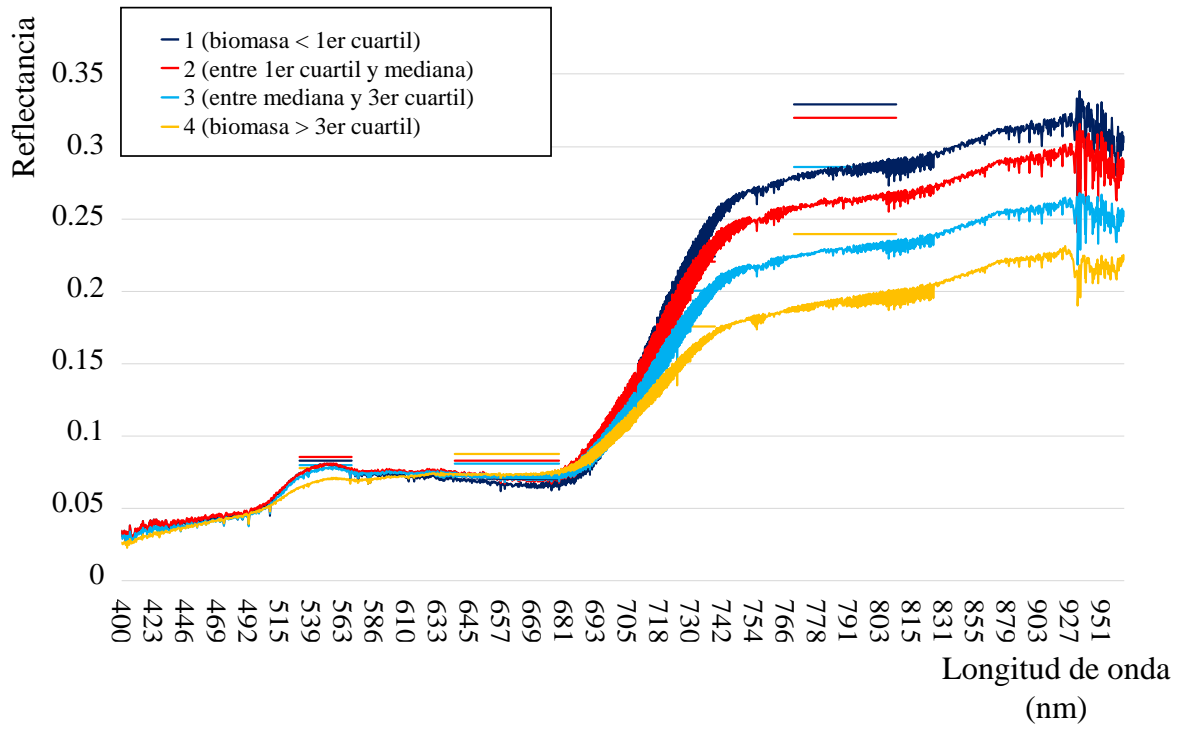


Figura 65: Firmas espectrales del espartillo en función de la cantidad de biomasa (Cada grupo representa 15 muestras en función del ranking de biomasa total).

## DISCUSIÓN

### 4.1. Comparación entre los EB y los EA en base al estado del arte

Muchos autores sostienen que el uso de la bioenergía es compatible con la conservación de los servicios ecosistémicos que prestan los pastizales naturales. Jungers et al. (2014) trabajaron en pastizales con predominancia de especies nativas de áreas protegidas en la región oeste de Minnesota. Sostuvieron que las cosechas anuales al final del verano no afectaron la biodiversidad y eran aptas para bioenergía, señalando la conveniencia de complementar la conservación del recurso con el uso bioenergético. Sosa et al. (2019) evaluaron diferentes frecuencias de corte de biomasa para bioenergía y reportaron que ni los artrópodos ni las comunidades de plantas se veían afectados por la cosecha de biomasa, al compararlo con parcelas testigo.

Una cuarta parte de la reserva mundial de carbono orgánico del suelo (COS) se encuentra en pastizales y sabanas (Lal, 2004). Por lo tanto, mucha investigación se ha centrado en estudiar los efectos del manejo de pastizales en el COS (Conant et al., 2001; Maillard y Angers, 2014; Chang et al., 2016; Lorenz y Lal, 2018). Los efectos de la quema de pastizales en el COS y los balances de carbono también se han estudiado en gran medida con resultados diferentes. Knicker (2007) revisó investigaciones sobre este tema que muestran que, en algunos escenarios de quema de pastizales, el COS aumentó mientras que en otros casos disminuyó. Estos resultados contrastantes pueden esperarse considerando que el COS puede modificarse por diferentes causas, y los incendios de pastizales pueden variar en intensidad y duración, así como la condición de conductividad del suelo.

Otros factores a considerar en futuras investigaciones son las pérdidas de suelo por erosión y el efecto diferencial que tienen sobre esta erosión la cosecha de biomasa y el fuego. La erosión del suelo simulada después de un incendio, aumenta según Johansen et al. (2001). Las cifras de las simulaciones de erosión del suelo después de un incendio resultaron más altas en los bosques que en los pastizales. En un metanálisis estadístico, Vieira et al. (2015) encontraron que la ocurrencia de incendios tenía un efecto significativo en la respuesta hidrológica, aumentando el coeficiente de escorrentía en comparación con las condiciones sin quemar para cada una de las clases de severidad de las quemaduras analizadas. La elevada cantidad de biomasa remanente postcosecha (*circa* 4 Mg de materia seca por ha) que se dejaría en superficie según mediciones

de esta Tesis, generaría una mayor rugosidad en comparación con las quemas, lo cual disminuiría la erosión tanto hídrica como eólica (Blanco-Canqui y Lal, 2010).

Al considerar el balance total de carbono, las emisiones de carbono por combustión, y las mayores tasas de mineralización de carbono después de la quema, Zhao et al. (2012) reportaron que los incendios aumentaban las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera no solo durante el proceso de combustión, sino también durante un período prolongado posterior a la quema, en comparación con los humedales no quemados del noreste de China.

Investigaciones anteriores encontraron que las reservas totales de carbono eran un 60 % más altas en los pastizales clausurados durante la estación seca que en aquellos manejados con incendios prescritos (Bikila et al., 2016). La propuesta de esta Tesis es un término medio entre una cosecha completa de biomasa y una clausura, ya que la mitad de la biomasa total permanecería en el suelo debido a la baja eficiencia de cosecha de los pastizales de *S. argentinensis* (alrededor del 50%). Por lo tanto, podría plantearse la hipótesis de que el COS aumenta en un experimento de cosecha versus quema. Se deben realizar más investigaciones para probar esta hipótesis.

En esta investigación, la utilización energética del biochar se consideró siguiendo un ACV similar al realizado por Jens et al. (2014). Se deben evaluar otros usos potenciales del biochar en futuras investigaciones, como el carbón activado para aplicaciones de adsorción, enmiendas del suelo y secuestro de carbono, entre otros usos potenciales (Brewer et al., 2009).

De estos cálculos se puede concluir que el sistema EBt es el que tiene más recorrido necesario para aumentar su eficiencia. Esto dependerá fundamentalmente del aprovechamiento que pueda darse a los residuos sólidos de la fermentación para obtener bioetanol. Cabe resaltar que el bioetanol de segunda generación no es una tecnología madura aún por lo que podrá mejorarse el aprovechamiento de los residuos en la medida que se avance en el *know how* de la misma. Estos residuos podrían aprovecharse con fines bioenergéticos o con algún otro fin en caso de encontrarse alguna aplicación en cuyo caso se verían disminuidos los impactos ambientales de la producción de bioetanol por los productos o procesos evitados por la expansión del sistema.

La cosecha de biomasa es una técnica que si se emplea con mucha frecuencia puede resultar perjudicial para el ambiente sobre el cual se practica, por la elevada remoción del nutrientes y

por dejar descubierto el suelo haciéndolo más vulnerable a la erosión hídrica y eólica (Cherubin et al., 2018). El planteo de esta Tesis evitaría estos inconvenientes debido a que en las cosechas se dejarían aproximadamente 4 Mg de biomasa remanente por ha que harían su aporte a la producción de materia orgánica.

A su vez, se propone como práctica de manejo, dos a tres años de pastoreos y períodos de descanso entre cosechas sucesivas de biomasa a fin de mantener la productividad y la biodiversidad. Las frecuencias de corte, el tiempo transcurrido entre el corte y el ingreso de la hacienda y la intensidad del pastoreo, son algunos de tantos indicadores que podrían afectar la sostenibilidad del recurso biomásico y la biodiversidad de estas comunidades (Feldman y Lewis, 2005) en el tiempo así como al balance de carbono en el suelo, por tanto, sería recomendable evaluar el efecto de distintas prácticas de manejo sobre estos indicadores ambientales.

Considerando que: i) dentro de estos ecosistemas se ha reportado la presencia de bacterias fijadoras de nitrógeno, principalmente de los géneros *Nostoc*, *Anabaena* y *Oscillatoria* (Di Domenica et al., 2013); ii) *S. argentinensis* presenta una alta eficiencia en el uso de nitrógeno, como la mayoría de las gramíneas C4; iii) estos ecosistemas son frecuentemente sometidos a quemas prescritas sin que quede nitrógeno en las cenizas que quedan en el campo; iv) solo algunos minerales como el K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO y MgO permanecen dentro de las cenizas después de las quemas prescritas (Jozami et al., 2013); y v) las cenizas y el biocarbón producidos durante la gasificación podrían devolverse al suelo como enmiendas; planteamos la hipótesis de que todos los EB serían más sostenible que los EA. En estos escenarios actuales, además de depender de combustibles fósiles para producir energía, se practican quemas frecuentes de espantillares emitiendo GEI y material particulado que afectan negativamente a la salud de las poblaciones adyacentes a las zonas incendiadas.

#### **4.2. Análisis de Ciclo de Vida**

Se realizaron tres ACV de escenarios bioenergéticos (EB) empleando biomasa de *S. argentinensis* con fines comparativos, respecto a los escenarios actuales (EA), basados sobre combustibles fósiles.

Al analizar la categoría de impacto cambio climático, en todos los EB se lograron reducciones notables de emisiones de GEI respecto a los EA. Estos resultados son esperables

ya que la mayor parte de las emisiones durante la combustión de biomasa, no debe contabilizarse en un ACV por tratarse de CO<sub>2</sub> biogénico extraído de la atmósfera durante la fijación de carbono por parte de la vegetación (Pourhashem et al., 2015).

La novedad de los EB aquí estudiados es que no solo presentan menores emisiones que los escenarios basados en combustibles fósiles, sino que además disminuyen notablemente la concentración de CO<sub>2</sub>eq atmosférico debido a los procesos evitados. De estos procesos evitados, los más relevantes son: i) las quemaduras de pastizales las cuales liberan actualmente cantidades significativas de GEI; y ii) las emisiones evitadas en aquellos escenarios en los cuales se pueden aprovechar subproductos con alta eficiencia de uso de la energía de la biomasa.

Los resultados de GWP de todos los EB fueron muy favorables al compararlos con los EA y los procesos evitados fueron en buena parte responsables de este resultado. Esto permitiría aplicar a créditos de carbono (Byrd et al., 2018) para sistemas productivos de los Bajos Submeridionales que destinen la biomasa a producir bioenergía, máxime considerando que la misma no produciría cambios ni directos ni indirectos en el uso del suelo y no competiría con la producción de energía. En trabajos futuros se debería abordar el efecto sobre otras categorías de impacto no evaluadas en esta Tesis para comparar el desempeño ambiental en las mismas de los EB respecto a los EA.

Otros pastizales C4 dominados por *Elionorus muticus* y *Panicum prionitis* que a menudo se queman (Kunst et al., 2003; Massa et al., 2016, 2017) también podrían considerarse con fines bioenergéticos en complementariedad a la cría de ganado en futuras investigaciones. En todos estos casos, se contaría con las emisiones evitadas por no quemarse el pastizal natural y los procesos requeridos para su cosecha serían muy similares a los reportados en esta Tesis. Probablemente se requiera menos energía considerando la ausencia de hormigueros en estas comunidades.

Otros autores han reportado la viabilidad técnica de producir gas, electricidad y calor a partir de especies del género *Spartina* aunque esta alternativa no fue evaluada con perspectiva de ACV (Dong et al., 2007). Este tipo de alternativas son por lo general muy favorables desde la perspectiva de ACV debido a que maximizan el aprovechamiento del recurso, aumentan la cantidad de procesos evitados mejorando el desempeño ambiental del producto y minimizan los residuos generados. Otros procesos termoquímicos podrían evaluarse a futuro con perspectiva de ACV. Para el espartillo, se ha podido realizar el proceso de pirólisis obteniéndose

como productos: i) una fase acuosa; ii) aceites; iii) alquitranes; y iv) gases. La composición de cada una de estas fracciones obtenidas ha sido exhaustivamente caracterizada (Rada Arias et al., 2020).

Considerando la categoría “uso de energía”, si bien los tres EB demandan menos energía que su respectivo EA, las diferencias son más notables en aquellos que autoabastecen energéticamente a la etapa industrial y en los que utilizan más eficientemente la energía renovable a lo largo del ciclo de vida en función del flujo de energía presentado en las figuras 18, 19 y 20. Se discutirán los resultados de cada EB por separado.

#### **4.2.1. Gasificación para producir bioelectricidad**

Aunque la gasificación es un método antiguo, recientemente ha crecido el interés en ella debido a su alta eficiencia energética, la posibilidad de almacenar energía y la amplia variedad de materiales que son factibles de ser gasificados (Prasad et al., 2015; Parascanu et al., 2019; Pattanayak et al., 2021). Samson et al. (2005) afirmaron que, aunque existen algunas barreras tecnológicas con respecto a la gasificación de pastos C4, como la baja densidad de energía y las altas cantidades de cloro que pueden dificultar su uso para la bioenergía, existen muchas soluciones posibles para superarlas. Además, este tipo de biomasa presenta muchas ventajas, ya que crecen en suelos marginales donde la agricultura es impracticable y tienen costos de cultivo muy bajos. Sin embargo, hay pocos trabajos sobre el uso de especies de pastizales naturales como materia prima para la gasificación y son contados los trabajos sobre especies emparentadas a *S. argentinensis*. Más reducido resultan aun la cantidad de ACV sobre ésta y otras especies emparentadas.

Moutsoglou (2012) simuló la gasificación de *Panicum virgatum* y *S. pectinata*, concluyendo que esta última produciría un gas de síntesis con un poder calorífico superior al primero. Emery et al. (2017) realizaron un ACV sobre la obtención de biogasolina a partir de pastizales de *S. pectinata* con hasta el 80 % de reducción de GEI. En ese planteo incluyen la utilización de 2,4-D para control de malezas de hoja ancha y fertilizante (75 kg de nitrógeno por ha). Ambos insumos no son necesarios en el planteo de esta Tesis. El uso herbicidas no se precisa dada la elevada dominancia de esta especie (Feldman y Lewis, 2007).

Jozami et al. (2013) afirmaron que el 96% de la demanda energética de nafta de la provincia de Santa Fe podría ser satisfecha si se utilizara la biomasa disponible en un tercio del área de

las comunidades de *S. argentinensis* para producir bioetanol. También en una evaluación técnico-económica de la gasificación de biomasa de *S. argentinensis*, se reportó un EROI de 5,4 (Jozami et al., 2017), muy similar al obtenido en esta Tesis para el EBe0. En ese trabajo, si bien se consideraron aprovechamientos elevados de energía térmica, similares a la eficiencia del EBe90, se consideró un secado de la biomasa con estufa lo cual disminuye notablemente el EROI.

En base a lo comentado en el párrafo anterior, resulta crucial aprovechar la energía del sol para orear la biomasa a campo evitando así un gasto innecesario de energía en la etapa industrial que puede resultar crucial tanto desde el punto de vista ambiental como económico. En una revisión de ACVs sobre sistemas de densificación de biomasa Muazu et al. (2017) reportaron que el secado insume desde un 6% a un 65% de la energía requerida en el proceso y que dicho rango depende del contenido de humedad de la materia prima. La densificación, es un proceso necesario para facilitar la logística de la biomasa en una planta de gasificación, pero el secado de la biomasa para alcanzar valores de humedad compatibles con los requeridos para este proceso, debe producirse necesariamente a campo.

En todos los EBe evaluados en esta Tesis, el impacto ambiental (medido a través de GWP y CED) resultó menor que su contraparte fósil. Las emisiones de GEI sin contabilizar los procesos evitados, ascienden a 200 kg de CO<sub>2</sub>eq por MWh de electricidad (equivalentes a 55 g de CO<sub>2</sub>eq por MJ). Estos resultados son consistentes con una revisión que abordó 58 ACV que evaluaron la producción de electricidad y/o calor, en el cual la mitad de los resultados de obtención de electricidad reportaron emisiones de entre 10 y 90 g de CO<sub>2</sub>eq por MJ (Muench y Guenther, 2013). Al considerar los procesos evitados por la expansión del sistema, los EBe presentan mejor desempeño que las alternativas evaluadas en la mencionada revisión. Las emisiones de CO<sub>2</sub>eq de las quemadas evitadas consideradas en esta Tesis son un factor determinante de estas diferencias al comparar con otros ACV donde no existe un proceso evitado semejante.

#### **4.2.2. Pellets para calefacción residencial**

En la Argentina el mercado de estufas alimentadas con pellets es muy incipiente, aunque ya se encuentran distintos modelos comercializados en los portales de compraventa más conocidos, aunque a precios que triplican los modelos más difundidos de estufas de tipo tiro balanceado (equiparando la potencia entregada). Por otra parte, el costo de la biomasa sería otra

variable no menor a considerar; también se consiguen actualmente pellets de madera en el mercado argentino a valores que, por unidad de energía, duplican el costo del gas natural envasado. Se debe considerar que el gas natural se encuentra subsidiado por ser muy utilizado por los sectores de la población con menor poder adquisitivo.

A nivel global, en muchas zonas se están reemplazando los sistemas de calefacción residencial basados en leña por estufas que se alimentan con pellets de madera, los cuales resultan más eficientes y amigables con el ambiente (Quinteiro et al., 2019). En ese trabajo se reportaron de 7,8 g de CO<sub>2</sub>eq emitidos por MJ de calor entregado por la combustión de pellet de madera de pino marítimo. Estos valores fueron muy inferiores a las emisiones causadas por la combustión de la leña siendo el principal motivo, la baja eficiencia de la combustión y la baja eficiencia de conversión energética de la leña (menor al 10%). Si bien las estufas de tiro balanceado tienen menor eficiencia de conversión energética (Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2008) que las estufas a pellets, las diferencias no son tan notables como las observadas entre la leña y el pellet reportadas por Quinteiro y colaboradores en el trabajo antes citado.

En una extensa revisión bibliográfica de ACV sobre pellets de diversas materias primas, Martín-Gamboa et al. (2020) graficaron las dos categorías de impacto de la presente Tesis (GWP y CED) en una figura que adaptamos (figura 66). Cada corchete de la figura indica una referencia bibliográfica de Martín-Gamboa et al. (2020) y en ella se puede apreciar que hay una relación muy estrecha entre ambas categorías de impacto: a mayor CED mayor GWP. Los resultados de EBC se indican dentro de la figura 63, con y sin la inclusión de las emisiones de GEI por la quema del pastizal. Sin la inclusión de la quema evitada, el EBC se encontraría muy cercana a la línea de regresión lo cual muestra que una forma de mejorar el desempeño ambiental de la bioenergía, es utilizar procesos cuyos subproductos reemplacen procesos con elevadas emisiones de CO<sub>2</sub>eq por UF.

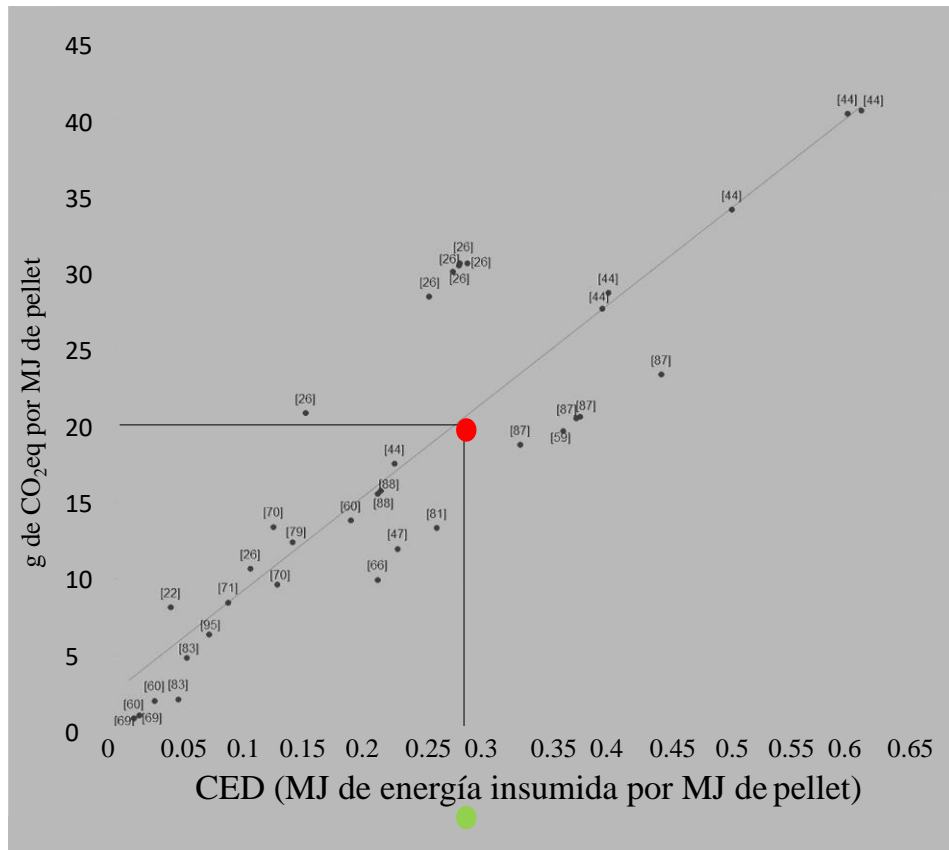


Fig 66: adaptación de la figura 7 de (Martín-Gamboa et al., 2020) con datos de esta Tesis incorporando EBC con (círculo verde) y sin (círculo rojo) la quema del pastizal como proceso evitado. Cada corchete es una cita de la revisión bibliográfica del mencionado artículo.

### 4.2.3. Bioetanol para el transporte

Los distintos escenarios evaluados resultaron ser carbono negativos debido a que las emisiones evitadas por las quemas fueron superiores a las emisiones producidas a lo largo de los sistemas-productos analizados. A su vez, estas emisiones resultaron muy variables en función de los distintos considerandos que se modelaron en referencia al autoabastecimiento energético de la etapa industrial. Sin considerar las quemas evitadas, los sistemas analizados en esta Tesis emitieron por cada MJ de bioetanol producido, entre 35 y 78 gramos de CO<sub>2</sub>eq. Estas emisiones resultan consistentes con las reportadas por Morales et al. (2015) en una extensa revisión bibliográfica de ACV de bioetanol.

Profundizando el análisis en la categoría de impacto “uso de energía”, los resultados no fueron desfavorables solo para el supuesto de la etapa industrial con datos de Luo et al (2009) sin considerar el autoabastecimiento energético de la planta industrial. Morales et al. (2015) reportan, en la revisión de ACV mencionada en el párrafo anterior, que los trabajos sobre

bioetanol de segunda generación presentaron mayoritariamente EROI mayores a 1. Solo cuatro trabajos reportaron EROI menores a 1 con el común denominador de no considerar el uso de la lignina para cogeneración de energía. En este sentido, resulta crucial aumentar la circularidad (aprovechar todos los residuos del sistema) y esto puede evidenciarse de los diagramas de Sankey (figuras 18 a 20) incluso para la situación más optimista aquí analizada (datos de Luo con autoabastecimiento energético de la biorefinería), donde se observan pérdidas de 1,82 MJ de energía desaprovechada por cada MJ de bioetanol obtenidos.

Por otra parte, el uso de pretratamientos biológicos como los hongos de podredumbre de la madera, para degradar la lignina permitiendo hidrolizar los carbohidratos estructurales de la pared celular, permitirían reducir notablemente el uso energía y la producción de residuos derivados de la etapa industrial (Liong et al., 2012). En el espartillo, se ha evaluado y contrastado con pretratamientos convencionales, el pretratamiento biológico con secretomas del hongo *Pycnoporus sanguineus*, obteniéndose un buen desempeño a escala de laboratorio (Larran et al., 2015). También se ha probado este pretratamiento en otra especie gramínea C4, *Panicum prionitis* (Gauna et al., 2018).

#### 4.3. Estimación de biomasa

Se desarrollaron modelos de estimaciones de las fracciones de biomasa de *Spartina argentinensis* con valores aceptables de desempeño predictivo, al menos al compararlo con otros trabajos sobre comunidades de especies del género *Spartina* (Trilla et al., 2010; González Trilla et al., 2016).

Las firmas espectrales fueron analizadas en función de la estación de crecimiento de otoño y primavera. En las cosechas primaverales los porcentajes de biomasa senescente resultaron ser mayores a los otoñales (entre 70 y 80% en primavera vs 40 a 55% en otoño). Trilla et al. (2010) reportaron, en cosechas de *S. densiflora* realizadas entre 2005 y 2007 en las costas de la laguna de Mar Chiquita, valores máximos de biomasa verde en el mes de febrero y mínimos entre agosto y octubre en coincidencia con los resultados de esta Tesis para *S. argentinensis*. Si bien las especies son cercanas desde un punto de vista taxonómico, las fracciones de biomasa aparentemente no tendrían comportamientos ecofisiológicos semejantes respecto de la proporción de biomasa total representada por la biomasa verde, ya que para *S. densiflora* ambas variables están altamente correlacionadas (0,99) mientras que en el caso de *S. argentinensis* los valores de correlación entre biomasa total y biomasa verde son más bajos (0,63). El tiempo

desde la última quema podría ser otro factor que afecte a esta correlación ya que si el espartillar fue quemado recientemente, la fracción de biomasa total correspondiente a biomasa verde será mayor (Feldman et al., 2004).

Los valores de reflectancia en el sector infrarrojo, aumentan notablemente en la estación de otoño al contrastarlos con la estación primaveral en el cual el ascenso de reflectancia con la longitud de onda es más paulatino. Al ser una especie C4, las mayores tasas de crecimiento se registran durante el verano. A la salida del invierno y principios de la primavera, el incremento en las temperaturas estimula la emergencia y crecimiento de nuevas hojas fotosintéticamente muy activas, rodeadas de las hojas senescentes de la temporada anterior que se encuentran aún unidas a la mata de espartillo.

En el continente asiático se han obtenido con un espectrómetro las firmas espectrales de otra especie emparentada, *S. alterniflora* (Ouyang et al., 2013), encontrando un comportamiento muy similar al de *S. argentinensis*. Esta similitud resulta lógica desde un punto de vista ecofisiológico: los valores de reflectancia en el rojo (NIR) resultan menores (mayores) en la estación otoñal (primaveral). La vegetación que crece activamente suele absorber más radiación en el rojo y reflejar más en el infrarrojo, comportamiento a partir del cual se da tanta relevancia al índice NDVI, que toma valores cercanos a uno para vegetación creciendo activamente y cero para vegetación poco activa.

Se dividieron las 60 muestras de las últimas dos cosechas (solo en estas se obtuvieron datos con el espectrómetro) en cuartiles rankeados por cantidad de biomasa total de 15 muestras cada uno siendo el grupo uno (cuatro) el de menor (mayor) biomasa total. Llamativamente en los grupos con mayor biomasa total, las firmas espectrales muestran valores más bajos en el sector NIR y más altos en el Rd con lo cual, a mayor biomasa, los valores de NDVI disminuyen para las comunidades de *S. argentinensis*. Este comportamiento podría ser el resultado de la heterogeneidad en los espartillares (Feldman y Lewis, 2005), en los que pueden encontrarse zonas con abundante biomasa adyacentes a zonas con suelo descubierto.

Si bien lo ideal sería que las variables explicativas evaluadas (bandas espectrales e índices espectrales derivados de las mismas) no interaccionen con el sitio, a fin de poder extrapolar los modelos a escalas más grandes con imágenes satelitales, el efecto sitio resultó significativo para todas las fracciones de biomasa. Byrd et al. (2018) obtuvieron modelos predictivos de biomasa para distintas especies dominantes de pantanos salinos de las fronteras de EEUU. Empleando

la técnica de bosques aleatorios obtuvieron valores de  $R^2$  de 0,58 para estimar biomasa verde y dicho valor descendió a 0,45 al quitar la variable sitio lo cual resulta coincidente con los resultados obtenidos en esta Tesis. Si bien los valores de  $R^2$  obtenidos en esta Tesis para *S. argentinensis* fueron superiores a los de Byrd et al. (2018), el desempeño analizado a partir del NRSME resulta menor.

Los modelos generados en esta Tesis podrán ser validados en trabajos futuros para poder diferenciar con herramientas de teledetección, zonas con abundante cantidad de biomasa de espartillo de aquellas zonas con menor cantidad. Otra línea que sería importante abordar es la posibilidad de cuantificar la densidad de tacurúes ya que, a mayor densidad de los mismos, más combustible se requiere para roturarlos, en detrimento del desempeño ambiental de la bioenergía así obtenida.

Si bien con la resolución espacial del dron se pueden identificar fácilmente los tacurúes, sería importante poder obtener una medida certera de la densidad de los mismos con imágenes satelitales en las cuales, por la baja resolución (pixels de 10 metros para el satélite sentinel) no pueden identificarse cada uno de ellos. En función de la bibliografía, el suelo seco tiene una reflectancia muy superior en la banda roja (Manzo et al., 2015) a la de la vegetación (no así el suelo húmedo cuya reflectancia acerca a la de la vegetación) con lo cual podría hipotetizarse que, en condiciones de varios días sin ocurrencia de precipitación, una región con elevada densidad de tacurúes, tendrá mayor reflectancia en el rojo que aquellas zonas sin su presencia.

## CONCLUSIONES

En esta Tesis se pudieron evaluar con la metodología de ACV los impactos ambientales resultantes de la producción de electricidad y calor para el sector industrial, calor para el sector residencial y bioetanol para el transporte. Se evaluaron las categorías de impacto “cambio climático” y “uso de energía” con fines comparativos para contrastar los resultados de los escenarios bioenergéticos planteados con los actuales escenarios basados en energía fósil.

En todos los escenarios bioenergéticos analizados, las emisiones resultaron considerablemente inferiores en comparación con el escenario actual verificando la primera hipótesis. Con excepción de uno de los escenarios de producción de bioetanol, en todos los escenarios bioenergéticos, se disminuyen las concentraciones de GEI de la atmósfera por tratarse de procesos carbono negativo. Las emisiones de GEI por las quemadas evitadas y el autoabastecimiento de los procesos industriales resultan puntos claves para obtener un resultado favorable en la categoría de impacto Cambio Climático.

En la categoría de impacto “uso de energía”, si bien todos los escenarios bioenergéticos resultaron más favorables que los escenarios actuales, los valores podrían mejorarse bastante en el escenario de producción de bioetanol. Para ello resulta determinante dar mayor aprovechamiento a los residuos generados por la biorefinería ya sea para la producción de energía o para otros procesos o productos que puedan obtenerse a partir de los mismos.

Se caracterizó la firma espectral del espartillo en dos estaciones de crecimiento y la misma fue filtrada en función de la cantidad de biomasa encontrándose que a mayor biomasa, disminuye la reflectancia en el infrarrojo cercano. Se realizaron dos modelos predictivos de biomasa con datos observados de 90 muestras obtenidas en dos ubicaciones y en cinco fechas de muestreo: i) un modelo cualitativo de cuatro categorías de biomasa (1 la de menor biomasa y 4 la de mayor) con la metodología *Random forest* que acertó en la clasificación de la totalidad de las 90 muestras con las que se realizó el modelo; y ii) un modelo de regresión lineal múltiple.

Se corrieron ambos modelos para un polígono de 14.000 m<sup>2</sup> (más de 2 millones de pixels) para una de las fechas y se visualizó consistencia sobre todo para las zonas de mayor biomasa lo cual permitirá, mediante el procesamiento de imágenes satelitales, delimitar zonas de mayor biomasa. Estos modelos podrán ser validados en otros espartillares de la provincia en futuros trabajos. En función de los resultados, se verificó parcialmente la hipótesis 2 puesto que los modelos obtenidos, presentaron indicadores de desempeño entre regular y bueno.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdullah B, Syed Muhammad SAF ad, Shokravi Z, Ismail S, Kassim KA, Mahmood AN, Aziz MMA. 2019. Fourth generation biofuel: A review on risks and mitigation strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 107:37-50.
- Agencia Andaluza de la Energía. Glosario biocombustibles sólidos, biocarburantes y biocombustibles limpios alternativos. disponible en: <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/biogasolineras/biogasolinera/static/pdf/glosario.pdf>
- Ahmad T, Zhang D. 2020. A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. *Energy Reports* 6:1973-1991.
- Albanito F, Beringer T, Corstanje R, Poulter B, Stephenson A, Zawadzka J, Smith P. 2016. Carbon Implications of Converting Cropland to Bioenergy Crops or Forest for Climate Mitigation: A Global Assessment. *GCB Bioenergy* 8:81-95.
- de Andrade Junior MAU, Watson JEM, Williams BA, Allan JR, O'Bryan CJ, Maxwell SL. 2021. How to halve the carbon and biodiversity impacts of biofuel-driven land-use change in Brazil. *Biological Conservation* 260:109214.
- Araujo P, Arena AP, Civit B, Curadelli S, Feldman S, Jozami E, Mele F, Piastrellini R, Silva Colomer J. 2019. The Water Footprint in Bioenergy—A Comparison of Four Biomass Sources to Produce Biofuels in Argentina. Springer, Singapore. disponible en: [http://link.springer.com/10.1007/978-981-13-2739-1\\_1](http://link.springer.com/10.1007/978-981-13-2739-1_1)
- Bahel E, Marrouch W, Gaudet G. 2013. The economics of oil, biofuel and food commodities. *Resource and Energy Economics* 35:599-617.
- Barnes EM, Clarke TR, Richards SR, Colaizzi PD, Haberland J, Kostrzewski M, Waller P, Choi C, Riley E, et al. 2000. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. En: ASA-CSSA-SSSA, editor. the fifth international conference on precision agriculture and other resource management. Bloomington, MN, USA. p 1-15.
- Basu P. 2018. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. Academic press.
- Bikila NG, Tessema ZK, Abule EG. 2016. Carbon sequestration potentials of semi-arid rangelands under traditional management practices in Borana, Southern Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 223:108-114.
- Blanco-Canqui H, Lal R. 2010. Erosion on Grazing Lands. En: *Principles of Soil Conservation and Management*. Dordrecht: Springer Netherlands. p 345-373. disponible en: [http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-8709-7\\_13](http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-8709-7_13)
- Blonk Agri Footprint BV. 2015a. Agri - footprint 2.0 - Part 1: Methodology and basic principles.
- Blonk Agri Footprint BV. 2015b. Agri - footprint 2.0 - Part 2: Description of data.
- Bourke D, Stanley D, Rourke EO, Thompson R, Whelan R. 2013. Response of farmland biodiversity to the introduction of bioenergy crops : effects of local factors and surrounding landscape context. :1-15.

- Bracco S. 2016. *The Economics of Biofuels: The Impact of EU Bioenergy Policy on Agricultural Markets and Land Grabbing in Africa*. Abingdon, Oxon ; New York, NY : Routledge, 2016.: Routledge. disponible en: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781317218982>
- Breiman L. 2001. Random Forests. *Machine Learning* 2001 45:1 45:5-32.
- Brewer CE, Brown RC, Laird DA. 2012. Biochar characterization and engineering. *Graduate Teses and Dissertations*:12284.
- Brewer CE, Schmidt-Rohr K, Satrio JA, Brown RC. 2009. Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 28:386-396.
- de Bruijn H, van Duin R, Huijbregts MAJ. 2002. *Handbook on Life Cycle Assessment*. (de Bruijn H, van Duin R, Huijbregts MAJ, Guinee JB, Gorree M, Heijungs R, Huppes G, Kleijn R, de Koning A, et al., editores.). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Byrd KB, Ballanti L, Thomas N, Nguyen D, Holmquist JR, Simard M, Windham-Myers L. 2018. A remote sensing-based model of tidal marsh aboveground carbon stocks for the conterminous United States. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 139:255-271.
- Chang J, Ciais P, Viovy N, Vuichard N, Herrero M, Havlík P, Wang X, Sultan B, Soussana JF. 2016. Effect of climate change, CO<sub>2</sub> trends, nitrogen addition, and land-cover and management intensity changes on the carbon balance of European grasslands. *Global Change Biology* 22:338-350.
- Cherubin MR, Oliveira DMDS, Feigl BJ, Pimentel LG, Lisboa IP, Gmach MR, Varanda LL, Morais MC, Satiro LS, et al. 2018. Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. *Scientia Agricola* 75:255-272.
- Civit B. 2009. Desarrollo de indicadores regionales para su aplicación en estudios de análisis de ciclo de vida en la región árida del centro oeste argentino.
- Coelho ST, Perecin D, Rei F, Escobar JF, Freiria RC, Kimura WJ. 2022. Bioenergy Policies Worldwide. En: *Comprehensive Renewable Energy*. Elsevier. p 1-21. disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128197271000406>
- Colantoni A, Villarini M, Monarca D, Carlini M, Mosconi EM, Bocci E, Rajabi Hamedani S. 2021. Economic analysis and risk assessment of biomass gasification CHP systems of different sizes through Monte Carlo simulation. *Energy Reports* 7:1954-1961.
- Conant RT, Paustian K, Elliott ET. 2001. Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. *Ecological Applications* 11:343-355.
- Dash J, Curran PJ. 2004. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *International Journal of Remote Sensing* 25:5403-5413.
- Daughtry C. 2000. Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment* 74:229-239.
- Di Domenica V, Petenello MC, Feldman SR. 2013. Determinación de algas en suelo de espartillares. En: *XV Congreso y XXXIII Reunión Anual, Sociedad de Biología de Rosario*. . p 71.

- Dong Y, Dong L, Jing Y, Qiang N. 2007. Gas-heat-electricity triple cogeneration technology for gasification of *Spartina*. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 8.
- Eliana C, Jorge R, Juan P, Luis R. 2014. Effects of the pretreatment method on enzymatic hydrolysis and ethanol fermentability of the cellulosic fraction from elephant grass. Fuel 118:41-47.
- Emery I, Mbonimpa E, Kumar S, Muthukumarappan K, Wei L, Jahndideh A, Singh S, Owens V. 2017. Life cycle assessment of drop-in biofuels from prairie cordgrass. En: 2017 ASABE Annual International Meeting.
- Feldman SR, Bisaro V, Lewis JJP. 2004. Photosynthetic and growth responses to fire of the subtropical-temperate grass, *Spartina argentinensis* Parodi. Flora 199:491-499.
- Feldman SR, Lewis JP. 2005. Effects of fire on the structure and diversity of a *Spartina argentinensis* tall grassland. Applied Vegetation Science 8:77-84.
- Feldman SR, Lewis JP. 2007. Demographic responses to fire of *Spartina argentinensis* in temporary flooded grassland of Argentina. Wetlands 27:785-793.
- Ferchaud F, Vitte G, Mary B. 2016. Changes in soil carbon stocks under perennial and annual bioenergy crops. GCB Bioenergy 8:290-306.
- Fernández O, Busso C. 1999. Arid and semi-arid rangelands: two thirds of Argentina. disponible en:  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.550.86&rep=rep1&type=pdf>
- Friesen PC, Peixoto M de M, Lee DK, Sage RF. 2015. Sub-zero cold tolerance of *Spartina pectinata* (prairie cordgrass) and *Miscanthus × giganteus* : candidate bioenergy crops for cool temperate climates. Journal of Experimental Botany 66:4403-4413.
- Gao X, Dong S, Li S, Xu Y, Liu S, Zhao H, Yeomans J, Li Y, Shen H, et al. 2020. Using the random forest model and validated MODIS with the field spectrometer measurement promote the accuracy of estimating aboveground biomass and coverage of alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau. Ecological Indicators 112.
- Gauna A, Larran AS, Perotti VE, Feldman SR, Permingeat HR. 2018. Fungal pretreatments improve the efficiency of saccharification of *Panicum prionitis* Ness biomass. Biofuels 7269:1-7.
- Gitelson AA, Viña A, Arkebauer TJ, Rundquist DC, Keydan G, Leavitt B. 2003. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. Geophysical Research Letters 30:n/a-n/a.
- Godde CM, Boone RB, Ash AJ, Waha K, Sloat LL, Thornton PK, Herrero M. 2020. Global rangeland production systems and livelihoods at threat under climate change and variability. Environmental Research Letters 15.
- Golato M, Feijóo E, Franck Colombres F, Paz D, Cárdenas G. 2017. Estudio preliminar del aprovechamiento de los residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar como combustible adicional para calderas bagaceras de Tucumán (Argentina). Revista Industrial y Agrícola de Tucumán 94:21-31.
- Gomez LD, Steele-King CG, McQueen-Mason SJ. 2008. Sustainable liquid biofuels from biomass: the writing's on the walls. New Phytologist 178:473-485.

- González Trilla G, Pratolongo P, Kandus P, Beget ME, Di Bella C, Marcovecchio J. 2016. Relationship Between Biophysical Parameters and Synthetic Indices Derived from Hyperspectral Field Data in a Salt Marsh from Buenos Aires Province, Argentina. *Wetlands* 36:185-194.
- Gross MF, Hardisky MA, Wolf PL, Klemas V. 1991. Relationship between aboveground and belowground biomass of *Spartina alterniflora* (Smooth Cordgrass). *Estuaries* 14:180-191.
- Gu T. 2013. Green Biomass Pretreatment for Biofuels. :158.
- Guo J, Thapa S, Voigt T, Rayburn AL, Boe A, Lee DK. 2015. Phenotypic and Biomass Yield Variations in Natural Populations of Prairie Cordgrass (*Spartina pectinata* Link) in the USA. *BioEnergy Research* 8:1371-1383.
- Haboudane D, Miller JR, Tremblay N, Zarco-Tejada PJ, Dextraze L. 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment* 81:416-426.
- Hao S, Ryu D, Western A, Perry E, Bogena H, Franssen HJH. 2021. Performance of a wheat yield prediction model and factors influencing the performance: A review and meta-analysis. *Agricultural Systems* 194.
- Harald Aalde, Gonzalez P, Gytarsky M, Krug T, Kurz W a., Lasco R, Martino DL, McConkey BG, Ogle SM, et al. 2006. Generic methodologies applicable to multiple land-use categories. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* 4:1-59.
- Hardisky MA, Daiber FC, Roman CT, Klemas V. 1984. Remote sensing of biomass and annual net aerial primary productivity of a salt marsh. *Remote Sensing of Environment* 16:91-106.
- He W, Grant BB, Smith WN, Vanderzaag AC, Piquette S, Qian B, Jing Q, Rennie J. 2019. Assessing alfalfa production under historical and future climate in eastern Canada : DNDC model development and application. 122.
- Hendriks ATWM, Zeeman G. 2009. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 100:10-18.
- Huang YF, Syu FS, Chiueh P Te, Lo SL. 2013. Life cycle assessment of biochar cofiring with coal. *Bioresource Technology* 131:166-171.
- Hunt ER, Daughtry CST, Eitel JUH, Long DS. 2011. Remote Sensing Leaf Chlorophyll Content Using a Visible Band Index. *Agronomy Journal* 103:1090-1099.
- IEA. 2017. Key World Energy statistics 2021. Paris. disponible en: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>
- INDEC. 2021. Censo Nacional Agropecuario 2018. Resultados definitivos. (Instituto Nacional de Estadística y Censos, editor.). Buenos Aires, Argentina.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial. 2008. Programa Pruebas de Desempeño de Productos.
- International Standardization Organization (ISO). 2014. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Clases de pélets de madera. (ISO 17225-2:2014).

- IPCC. 2006. Generic methodologies applicable to multiple land- use categories. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 4:1-59.
- IPCC (institution/organization). 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva Switzerland. Cambridge/New York: Cambridge University Press.
- IRENA. 2019. Climate Change and Renewable Energy: National policies and the role of communities, cities and regions (Report to the G20 Climate Sustainability Working Group (CSWG)), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- ISO. 2006a. 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. disponible en: [www.iso.org](http://www.iso.org)
- ISO. 2006b. 14044: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines.
- Jakob K, Zhou F, Paterson AH. 2009. Genetic improvement of C4 grasses as cellulosic biofuel feedstocks. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant* 45:291-305.
- Jens F, Peters JF, Iribarren D, Dufour J. 2014. Life cycle assessment of pyrolysis oil applications. *Biomass Conversion and Biorefinery* 5:1-19.
- Johansen MP, Hakonson TE, Breshears DD. 2001. Post-fire runoff and erosion from rainfall simulation: Contrasting forests with shrublands and grasslands. *Hydrological Processes* 15:2953-2965.
- Jordan CF. 1969. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology* 50:663-666.
- Jozami E, L. Sosa L, R. Feldman S. 2013. *Spartina argentinensis* as feedstock for bioethanol. *Applied Technologies and Innovations* 9:37-44.
- Jozami E, Porstmann JC, Shocron A, Feldman SR. 2017. Techno-economic Assessment of Biomass Gasification of *Spartina argentinensis*. *Agrociencia-Uruguay*.
- Jungbluth N, Emmenegger MF, Dinkel F, Stettler C, Doka G, Chudacoff M, Dauriat A, Gnansounou E, Spielmann M, et al. 2007. Life Cycle Inventories of Bioenergy.ecoinvent report No. 17.
- Jungers JM, Sheaffer CC, Fargione J, Lehman C. 2014. Short-term harvesting of biomass from conservation grasslands maintains plant diversity. *GCB Bioenergy* 7:1050-1061.
- Knicker H. 2007. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. *Biogeochemistry* 2007 85:1 85:91-118.
- Kumar D, Murthy GS. 2012. Life cycle assessment of energy and GHG emissions during ethanol production from grass straws using various pretreatment processes. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17:388-401.
- Kunst C, Bravo S, Moscovich F, Herrera J, Godoy J, Vélez S. 2003. Fecha de aplicación de fuego y diversidad de herbáceas en una sabana de *Elionorus muticus* (Spreng) O. Kuntze. *Revista chilena de historia natural* 76:105-115.
- Kusnezov N. 1951. El genero *Camponotus* en la Argentina. *Acta zoologica Lilloana* XII:183-252.

- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123:1-22.
- Lampugnani ER, Khan GA, Somssich M, Persson S. 2018. Building a plant cell wall at a glance. *Journal of Cell Science* 131.
- Larran A, Jozami E, Vicario L, Feldman SR, Podesta FE, Permingeat HR. 2015. Evaluation of biological pretreatments to increase the efficiency of the saccharification process using *Spartina argentinensis* as a biomass resource. *Bioresource Technology* 194:320-325.
- Levine JS. 1991. Global biomass burning: Atmospheric, climatic and biospheric implications. disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1029/90EO00289>
- Lewis JP, Franceschi EA, Stofeua SL. 2000. Effect of ant-hills on the floristic richness of plant communities of a large depression in the Great Chaco. *Revista de Biología Tropical* 39:31-39.
- Lewis JP, Stofella SL, Pire EF, Franceschi EA, Carnevale NJ, Prado DE. 1990. Dynamics and Development of Floristic Richness in the Vegetation of a Large Depressed Area of the Great Chaco. *Flora* 184:63-77.
- Li RL, Qiu GY. 2011. *Spartina alterniflora*: Potential Bio-Energy Source for Biofuel Production in China. *Applied Mechanics and Materials* 142:247-251.
- Liong YY, Halis R, Lai OM, Mohamed R. 2012. Conversion of lignocellulosic biomass from grass to bioethanol using materials pretreated with alkali and the white rot fungus, *Phanerochaete chrysosporium*. *BioResources* 7.
- Lorenz K, Lal R. 2018. Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems. Cham: Springer International Publishing. disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-92318-5>
- Louhaichi M, Borman MM, Johnson DE. 2001. Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat. *Geocarto International* 16:65-70.
- Lucotte Y. 2016. Co-movements between crude oil and food prices: A post-commodity boom perspective. *Economics Letters* 147:142-147.
- Luisoni LH, Bissio JC. 2014. Producción y Calidad de Forraje de un Pajonal de *Spartina argentinensis*(Trin.) Parodi, Luego de la Quema. disponible en: [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta\\_produccion\\_y\\_calidad\\_de\\_forraje\\_de\\_pajonal\\_espar.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_produccion_y_calidad_de_forraje_de_pajonal_espar.pdf)
- Luo L, van der Voet E, Huppes G. 2009. An energy analysis of ethanol from cellulosic feedstock-Corn stover. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13:2003-2011.
- Maillard É, Angers DA. 2014. Animal manure application and soil organic carbon stocks: a meta-analysis. *Global Change Biology* 20:666-679.
- Manzo C, Valentini E, Taramelli A, Filippini F, Disperati L. 2015. Spectral characterization of coastal sediments using Field Spectral Libraries, Airborne Hyperspectral Images and Topographic LiDAR Data (FHyL). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 36:54-68.
- Martín-Gamboa M, Marques P, Freire F, Arroja L, Dias AC. 2020. Life cycle assessment of biomass pellets: A review of methodological choices and results. *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews 133.

- Massa E, Prado DE, Feldman SR. 2017. Efecto del fuego o el corte sobre la producción y la calidad forrajera de un pajonal dominado por *Panicum prionitis*. *Revista Argentina de Producción Animal* 37:9-20.
- Massa ES, Oakley LJ, Prado DE, Feldman SR. 2016. Resiliencia de un pajonal de *Panicum prionitis* Nees bajo distintas alternativas de manejo. *Ecología austral* 26:236-245.
- Mathews JA. 2008. Towards a sustainably certifiable futures contract for biofuels. *Energy Policy* 36:1577-1583.
- Mc Feeters SK. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* 17:1425-1432.
- Merzlyak MN, Gitelson AA, Chivkunova OB, Rakitin VY. 1999. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum* 106:135-141.
- Morales M, Quintero J, Conejeros R, Aroca G. 2015. Life cycle assessment of lignocellulosic bioethanol: Environmental impacts and energy balance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42:1349-1361.
- Moravvej Z, Makarem MA, Rahimpour MR. 2019. The fourth generation of biofuel. En: *Second and Third Generation of Feedstocks*. Elsevier. p 557-597. disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128151624000203>
- Moriarty P, Honnery D. 2012. What is the global potential for renewable energy? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16:244-252.
- Moutsoglou A. 2012. A comparison of prairie cordgrass and switchgrass as a biomass for syngas production. *Fuel* 95:573-577.
- Muazu RI, Borrion AL, Stegemann JA. 2017. Life cycle assessment of biomass densification systems. *Biomass and Bioenergy* 107:384-397.
- Muench S, Guenther E. 2013. A systematic review of bioenergy life cycle assessments. *Applied Energy* 112:257-273.
- National Renewable Energy Laborator. 2012. U.S. Life Cycle Inventory Database. disponible en: <https://www.lcacommons.gov/nrel/search>
- NREL. 2003. U.S. LCI Database Project — Phase I Final Report. disponible en: <http://www.osti.gov/bridge>
- Obernberger I, Weiß G, Kössl M. 2018. Development of a new micro CHP pellet stove technology. *Biomass and Bioenergy* 116:198-204.
- Ouyang Z-T, Gao Y, Xie X, Guo H-Q, Zhang T-T, Zhao B. 2013. Spectral Discrimination of the Invasive Plant *Spartina alterniflora* at Multiple Phenological Stages in a Saltmarsh Wetland. *PLoS ONE* 8:e67315.
- Parajuli PB, Nelson NO, Frees LD, Mankin KR. 2009. Comparison of AnnAGNPS and SWAT model simulation results in USDA-CEAP agricultural watersheds in south-central Kansas. *Hydrological Processes* 23:748-763.
- Parascanu MM, Puig-Gamero M, Soreanu G, Valverde JL, Sanchez-Silva L. 2019.

- Comparison of three Mexican biomasses valorization through combustion and gasification: Environmental and economic analysis. *Energy* 189:116095.
- Paris A. 2018. On the link between oil and agricultural commodity prices: Do biofuels matter? *International Economics* 155:48-60.
- Partzsch L. 2011. The legitimacy of biofuel certification. *Agriculture and Human Values* 28:413-425.
- Pattanayak S, Hauchhum L, Loha C, Sailo L. 2021. Feasibility study of biomass gasification for power generation in Northeast India. *Biomass Conversion and Biorefinery*.
- Patuzzi F, Prando D, Vakalis S, Rizzo AM, Chiaramonti D, Tirlor W, Mimmo T, Gasparella A, Baratieri M. 2016. Small-scale biomass gasification CHP systems: Comparative performance assessment and monitoring experiences in South Tyrol (Italy). disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.077>
- Pauly M, Gille S, Liu L, Mansoori N, de Souza A, Schultink A, Xiong G. 2013. Hemicellulose biosynthesis. *Planta* 238:627-642.
- Pire EF, Torres PS, Romagnoli OD, Lewis JP. 1991. The significance of ant-hills in depressed areas of the Great Chaco. *Revista de Biología Tropical* 39:71-76.
- Plácido J, Imam T, Capareda S. 2013. Evaluation of ligninolytic enzymes, ultrasonication and liquid hot water as pretreatments for bioethanol production from cotton gin trash. *Bioresource technology*.
- Popp J, Lakner Z, Harangi-Rákos M, Fári M. 2014. The effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32:559-578.
- Porter TF, Chen C, Long J a., Lawrence RL, Sowell BF. 2014. Estimating biomass on CRP pastureland: A comparison of remote sensing techniques. *Biomass and Bioenergy* 66:268-274.
- Pourhashem G, Adler PR, Spatari S. 2015. Time effects of climate change mitigation strategies for second generation biofuels and co-products with temporary carbon storage. *Journal of Cleaner Production*.
- Prasad L, Subbarao PMV, Subrahmanyam JP. 2015. Experimental investigation on gasification characteristic of high lignin biomass (*Pongamia shells*). *Renewable Energy* 80:415-423.
- PRé sustainability B.V. 2019. SimaPro 9.0.0.35. disponible en: [www.pre-sustainability.com/software](http://www.pre-sustainability.com/software)
- Pugesgaard S, Schelde K, Larsen SU, Lærke PE, Jørgensen U. 2014. Comparing annual and perennial crops for bioenergy production - influence on nitrate leaching and energy balance. *GCB Bioenergy*:1-14.
- Quinteiro P, Tarelho L, Marques P, Martín-Gamboa M, Freire F, Arroja L, Dias AC. 2019. Life cycle assessment of wood pellets and wood split logs for residential heating. *Science of the Total Environment* 689:580-589.
- Rada Arias E, Bertero M, Jozami E, Feldman SRSR, Falco M, Sedran U. 2020. Pyrolytic conversion of perennial grasses and woody shrubs to energy and chemicals. *SN Applied Sciences* 2:116.

- Rajagopal D, Sexton SE, Roland-Holst D, Zilberman D. 2007. Challenge of biofuel: filling the tank without emptying the stomach? *Environmental Research Letters* 2:044004.
- Ramoelo A, Cho MA, Mathieu R, Madonsela S, van de Kerchove R, Kaszta Z, Wolff E. 2015. Monitoring grass nutrients and biomass as indicators of rangeland quality and quantity using random forest modelling and WorldView-2 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 43:43-54.
- REN21. 2021. *Renewables 2021 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat.
- Rondeaux G, Steven M, Baret F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 55:95-107.
- Rouse JW, Hass RH, Schell JA, Deering DW, Harlan JC. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. disponible en: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19740008955>
- Sabbadin F, Pesante G, Elias L, Besser K, Li Y, Steele-King C, Stark M, Rathbone DA, Dowle AA, et al. 2018. Uncovering the molecular mechanisms of lignocellulose digestion in shipworms. *Biotechnology for Biofuels* 11:1-14.
- Samson R, Mani S, Boddey R, Sokhansanj S, Quesada D, Urquiaga S, Reis V, Ho Lem C. 2005. The Potential of C 4 Perennial Grasses for Developing a Global BIOHEAT Industry. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24:461-495.
- Sannigrahi P, Pu Y, Ragauskas A. 2010. Cellulosic biorefineries — unleashing lignin opportunities. :1-11.
- Services Acquire Procurement. The Sankey Diagram Generator. disponible en: <http://sankey-diagram-generator.acquireprocure.com/>
- Sosa LL, Jozami E, Oakley LJ, Montero GA, Ferreras LA, Venturi G, Feldman SR. 2019. Using C4 perennial rangeland grasses for bioenergy. *Biomass and Bioenergy* 128:105299.
- Sripada RP, Heiniger RW, White JG, Weisz R. 2005. Aerial Color Infrared Photography for Determining Late-Season Nitrogen Requirements in Corn. *Agronomy Journal* 97:1443-1451.
- Sun Y, Mirza N, Qadeer A, Hsueh H-P. 2021. Connectedness between oil and agricultural commodity prices during tranquil and volatile period. Is crude oil a victim indeed? *Resources Policy* 72:102131.
- Thornley P, Adams P. 2017. *Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems*. Elsevier Inc.
- Thornthwaite C. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review* 38:55-94.
- Todd SW, Hoffer RM, Milchunas DG. 1998. Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices. *International Journal of Remote Sensing* 19:427-438.
- Trilla GG, de Marco S, Marcovecchio J, Vicari R, Kandus P. 2010. Net primary productivity of *Spartina densiflora* brong in an SW Atlantic Coastal salt marsh. *Estuaries and Coasts* 33:953-962.
- United Nations. 2021. *Energy Statistics Pocketbook*. (United Nations Publications, editor.). New York: United Nations Publications.

- US Department of Energy. 2021. Alternative Fuels Data Center. Global ethanol production by country or region.
- Verón SR, Jobbágy EG, Di Bella CM, Paruelo JM, Jackson RB. 2012. Assessing the potential of wildfires as a sustainable bioenergy opportunity. *GCB Bioenergy* 4:634-641.
- Vieira DCS, Fernández C, Vega JA, Keizer JJ. 2015. Does soil burn severity affect the post-fire runoff and interrill erosion response? A review based on meta-analysis of field rainfall simulation data. *Journal of Hydrology* 523:452-464.
- Wei Su C, Wang X-Q, Tao R, Oana-Ramona L. 2019. Do oil prices drive agricultural commodity prices? Further evidence in a global bio-energy context. *Energy* 172:691-701.
- Wernet G, Bauer C, Steubing B, Reinhard J, Moreno-Ruiz E, Weidema B. 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment* 21:1218-1230.
- World Resources Institute: Washington DC. 2022. Climate Watch Historical GHG Emissions. disponible en: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>
- Yang X, Guo X. 2014. Quantifying responses of spectral vegetation indices to dead materials in mixed grasslands. *Remote Sensing* 6:4289-4304.
- Zeng N, Ren X, He H, Zhang L, Zhao D, Ge R, Li P, Niu Z. 2019. Estimating grassland aboveground biomass on the Tibetan Plateau using a random forest algorithm. *Ecological Indicators* 102:479-487.
- Zhao H, Tong DQ, Lin Q, Lu X, Wang G. 2012. Effect of fires on soil organic carbon pool and mineralization in a Northeastern China wetland. *Geoderma* 189-190:532-539.

## Anexo I

Porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina de *Spartina argentinensis*. Extraído de la Tabla 4 de Sosa, L. L.; Jozami, E.; Oakley, L.J.; Montero, G.A.; Ferreras, L.A.; Venturi, G. Feldman, S.R. 2019. Using C4 perennial rangeland grasses for bioenergy. Biomass & Bioenergy 128:105299. ISSN 0961-9534. DOI 10.1016/biombioe.2019.105299

Fracción	%
Celulosa	38,71
Hemicelulosa	27,23
Lignina	9,64
Cenizas	6,48

## Anexo II

Composición de *Spartina argentinensis*. Extraído de la Tabla 2 de Rada Arias, E.; Bertero, M.; Jozami, E.; Feldman, S.R.; Falco, M.; Sedran, U. 2020. Pyrolytic conversion of perennial grasses and woody shrubs to energy and chemicals. S.N. Applied Sciences 2:116. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1911-4>. ISSN: 2523-3963 (Print) 2523-3971 (Online).

fracción	% base seca
Materia volátil	69,9
Carbono fijo	22,2
Cenizas	7,9
Composición elemental	
C	50,2
H	6,1
O	35,1
N	0,7

Anexo III:  
Informe de la gasificación de *Spartina argentinensis*



**REPORTE DE PRUEBAS EN SISTEMA DE GASIFICACIÓN**

**FECHA:** 20/03/18

**CLIENTE:** BIOCERES S.A.

**BIOMASA UTILIZADA:** ESPARTILLO

En la fecha indicada se llevaron a cabo pruebas de funcionamiento del Sistema de Gasificación para biomasa INSAV GASIFIER 100, con capacidad nominal de generación eléctrica de 100 Kw/h.

La biomasa utilizada para estas pruebas fue el Espartillo, provisto por la firma Bioceres, recibido con una humedad aproximada del 20 %.

Luego de triturarlo mediante un molino a martillos, el Espartillo es ingresado al proceso.

Una vez completado el llenado del equipo, se verifica durante un lapso de 6 horas los parámetros de cantidad de biomasa, temperaturas, presiones y generación de energía .

Tras completar 18 horas de marcha continua se obtuvieron los siguientes resultados:

- El consumo de biomasa para la generación constante de 100 Kw fue de 83 Kg/hora.
- El rendimiento del sistema es de 1.2 Kw/h generado por kilo de biomasa consumido, esto permite inferir que 1 Tn/h de biomasa genera 1.2 Mw/h de energía.

**SAVINI**  
INDUSTRIAS SAVINI SRL



COMPANY WITH  
QUALITY SYSTEM  
CERTIFIED BY DNV GL  
\* ISO 9001 \*



COMPANY WITH  
ENVIRONMENTAL SYSTEM  
CERTIFIED BY DNV GL  
\* ISO 14001 \*

Libertador y Pasteur / Villa Gdor. Galvez / Santa Fe  
Tel: 54 341 4928180 / 4929792 contacto@industriassavini.com

# ANEXO IV

Informe VRB 102-1401

## Equipamiento utilizado en Ensayo de Conformado de Pellets

26/05/2015

**N° Documento:** VRB102-1401  
**OT N°:** 6150000013

**Usuario:** Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario  
**CUIT:** 30-52355240-2

**Solicitante:** Emiliano Jozami

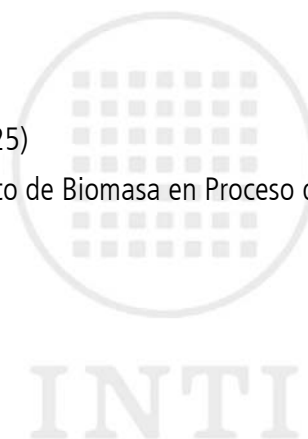
**Dirección:** Campo Experimental Villarino, Zavalla, Argentina (CP 2125)

**Servicio INTI:** 66 09 01 01 00 002 - Ensayo Industrial de Rendimiento de Biomasa en Proceso de Conformado de Pellets

**Biomasa:** *Spartina Argentinensis* (Espartillo)

**Fecha informe:** 26/05/2015

**Responsable:** Área Valorización de Recursos Biomásicos



Informe técnico del Ensayo Industrial de rendimiento de biomasa en proceso de conformado de pellets. Este documento fue realizado con recursos del Instituto Nacional de Tecnología Industrial, la información contenida en él es de carácter confidencial, facilitada al usuario para uso interno. Su uso sin previa autorización está prohibido. Ley 11.723





# ANEXO I

## Ensayo Equipamiento utilizado en Ensayo de Conformado de Pellets

### 1. Instalaciones y Personal

#### 1.1. Instrumental Utilizado

A continuación se listan los instrumentos utilizados para la caracterización y medición de la biomasa en las distintas etapas del proceso:

Instrumento	Modelo	Descripción	Características	Imagen
Moisture Meter	MD-2G	Medidor de humedad para controlar la humedad de la madera de referencia a los procesos de gasificación y pelletizado.	5-40[%] Resol. 1[%] Precisión $\pm 1$ [%]	
Pistola Laser Termómetro	425		Rango: -20°C a 350°C Precisión: -20°C a 50°C +/- 2.5°C 51°C a 350°C +/- (lectura * 1.5% + 1°C)	
Embolsadora con balanza INGESIR	N/A	Máquina embolsadora con balanza incorporada.	Rango: 0-100[kg]	
Balanza OHAUS	CS series	Balanza portátil para medición de densidades y caudales en proceso	Rango: 0-5[kg] Precisión: 0,1[g]	



## 2.1. Descripción de equipos y el proceso

El ensayo se realizó en la Planta Pelletizadora de Aserrín (PPA) ubicada en el Complejo Demostrativo de Biomasa INTI ubicado en el Municipio de Presidencia de la Plaza, provincia de Chaco.

La PPA está compuesta por tres bloques:

- **Adecuación de Biomasa:** La zona de adecuación es un bloque que tiene como propósito el llevar a la materia prima a valores aceptables en contenido de humedad (%H<sub>2</sub>O). El sistema cuenta con una tolva de carga la cual a través de un transportador de tornillo sin fin alimenta un secador rotativo de un solo paso cuya fuente de aire y gases calientes es generado en un hogar a leña dispuesto en esta zona. La regulación de la temperatura de secado se hace de manera manual abriendo clapetas de paso de aire frío en la mezcla. Finalmente luego del secado se encuentra un sistema de aspiración que regula el tiraje del sistema y permite una primera eliminación de finos con un ciclón. El transporte de la biomasa hasta la tolva de carga de la pelletizadora se realiza por un tornillo sin fin bajo nivel.



Imagen 1 - Secadero rotativo

- **Pelletizado:** la sección de pelletizado comienza con una tolva de descarga, seguida de una cinta alimentadora al silo, desde donde a través de un alimentador compuesto por dos tornillos sin fin regulables en velocidad, gobiernan el caudal de trabajo. Luego de esto, está el molino de martillo, seguido del dosificador o humidificador. Finalmente se encuentra la prensa pelletizadora, compuesta con un juego de matriz anular y rolos, donde se produce la extrusión y el conformado del pellets.



Imagen 2 - Pelletizadora

- Posee una capacidad máxima de  $Q_{max}=500$ [kg/h] y se obtiene un pellets de 6 [mm] de diámetro por una longitud variable. El producto al salir de la matriz tiene una elevada temperatura por lo que para estabilizarlo se lo enfría para que la lignina solidifique en un sistema de elevación con aire forzado lo que permite una última eliminación de finos.

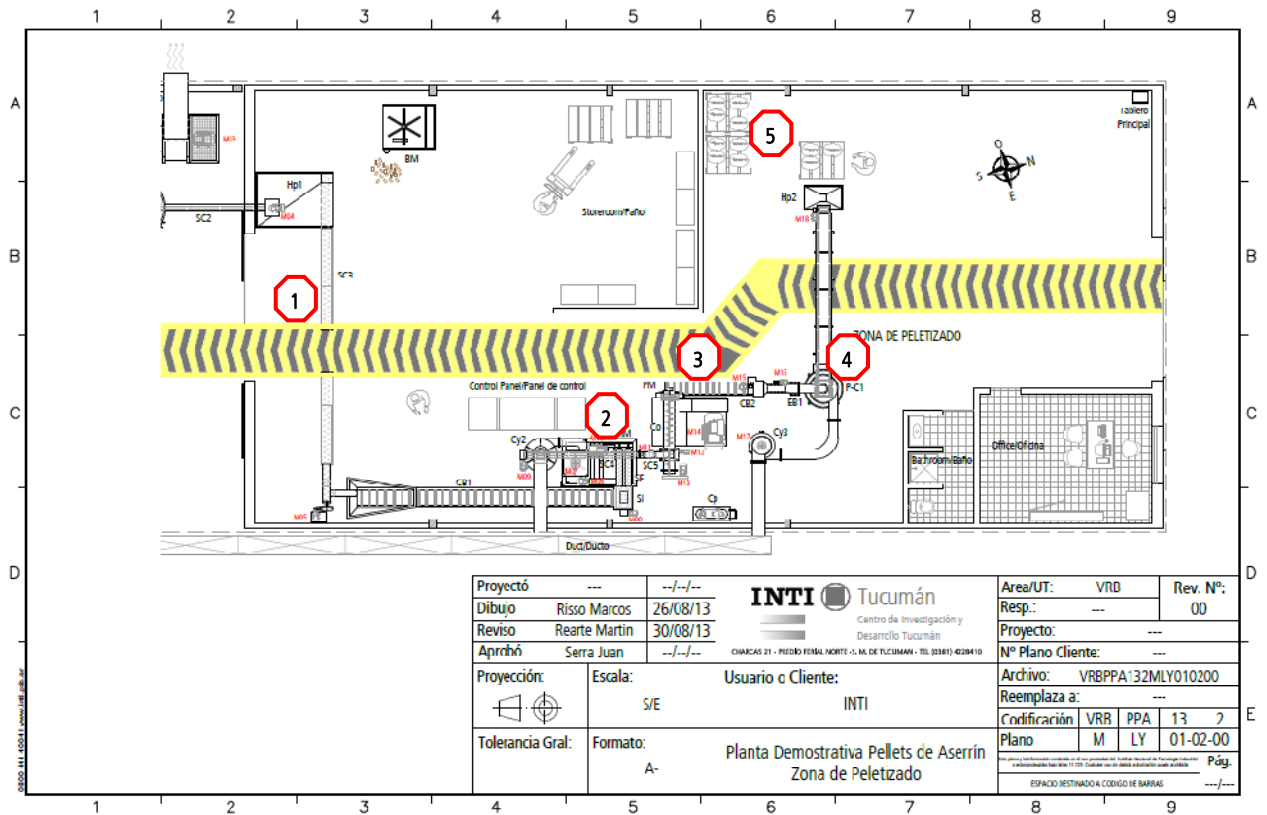
- **Embolsado:** Finalmente el pellet enfriado se transporta desde la tolva de enfriamiento hasta una tolva previa al equipo de embolsado del pellets mediante una cinta transportadora, donde previo a ser embalado se lo pesa.



Imagen 3 - Embolsadora

## 2.2. Layout PPA

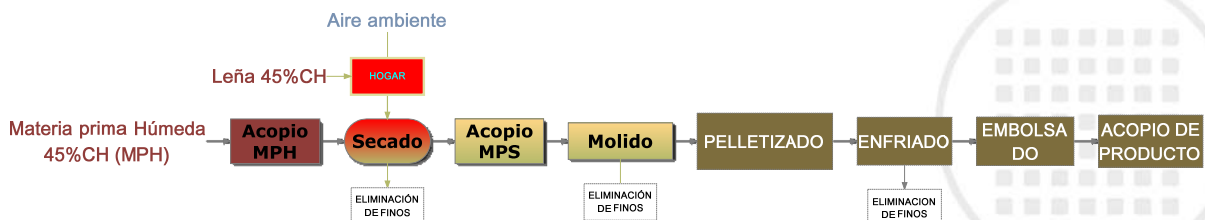
Planta de Pelletizado INTI - Municipio de Presidencia de la Plaza, Chaco (500[kg/hr])



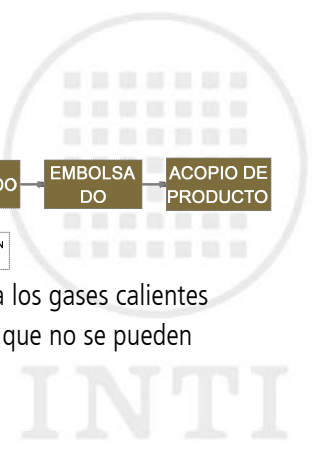
### Referencias:

1. Zona de Picado
2. Molino de martillo
3. Prensa Pelletizadora
4. Sistema de enfriamiento
5. Zona de embolsado y acopio de producto.

## 2.3. Diagrama del proceso estándar



El proceso estándar en la PPA contempla un hogar a leña externo que proporciona los gases calientes para el secado de la materia prima aprovechando residuos de la actividad forestal que no se pueden procesar en las plantas.



## 2.4. Equipos complementarios

Dadas las características de la biomasa objetivo se requirieron dos una máquinas adicionales (fuera de procedimiento) para efectuar transformaciones previas a la misma tratando de llevarla a condiciones de materia prima aceptable al proceso. Las máquinas utilizadas fueron una **Picadora de granos MOD. IRALOF 0,5[HP]** y otra **MOD. IRALOF 2,5[HP]** como se muestra en la Figura 2, compuestas por una boca de alimentación, cuchillas de corte o molienda interiores y motores eléctricos de 0,5[HP] y 2,5[HP] respectivamente accionadas por poleas. Ambas máquinas tienen la posibilidad de trabajar con tres zaranda o camisa agujereadas con orificios graduados en su interior para variar la granulometría del producto final.



Imagen 4 - Picadora IRALOF

## 2.5. PERSONAL AFECTADO

### INTI Tucumán

Ing. Martín Rearte  
Ing. Guillermo Martínez Pulido  
Ing. Sado Abdelhamid  
Tco. Marcos Risso

### INTI Chaco

Ing. Jesús Espindola

### INTI Formosa

Ing. Gustavo Muracciole

### Municipalidad PDP

6 Operarios

### Responsables

**ING. MARTIN REARTE**  
[mrearte@inti.gob.ar](mailto:mrearte@inti.gob.ar)

**ING. GUILLERMO MARTÍNEZ PULIDO**  
<mailto:guimar@inti.gob.ar>

**INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL**  
Centro de Investigación y Desarrollo, INTI - Tucumán

**Valorización de Recursos Biomásicos**  
Charcas 21, Predio Ferial Norte, Nave "D"  
San Miguel de Tucumán  
Tel. (0381) 4228410  
[tucuman@inti.gob.ar](mailto:tucuman@inti.gob.ar)



0800 444 4004 | [www.inti.gob.ar](http://www.inti.gob.ar)

Codificación

VRB102-1401\_I

Este documento se ha elaborado con recursos del Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Queda prohibido su uso o reproducción sin autorización Régimen Legal de la Propiedad Intelectual LEY 11.723.

Realizó:

MR,GMP

Rev. N°

02

Aprobó:

Fecha:

26/05/2015

Fecha:

01/06/2015

Fecha:

02/06/2015

# ANEXO V

## Informe VRB 102-1401

---

### Ensayo Industrial de Rendimiento de Biomasa en Proceso de Conformado de Pellets

N° Documento: VRB102-1401

Usuario Interno: Gerencia de Proyectos Especiales

OT N°: 6150000013

Solicitante: Gustavo Gil - Programa de energías renovables

SOT N°: 66-00000045

---

Usuario Final: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario

CUIT: 30-52355240-2

Dirección: Campo Experimental Villarino, Zavalla, Argentina (CP 2125)

Contacto: Dra. Susana Feldman

Mail: [sfeldman@unr.edu.ar](mailto:sfeldman@unr.edu.ar)

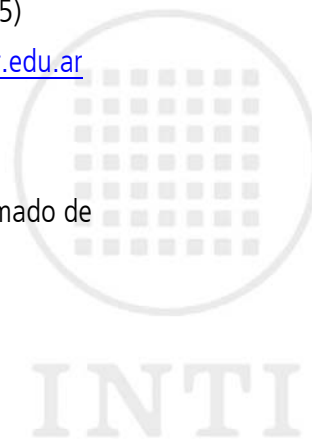
Tel.: (0 341) 4970080 ext. 1120

Servicio INTI: 66 09 01 01 00 002

Ensayo Industrial de Rendimiento de Biomasa en Proceso de Conformado de Pellets Biomasa: *Spartina Argentinensis* (Espartillo)

Fecha informe: 18/08/2015

Responsable: Área Valorización de Recursos Biomásicos



## Índice

1. OBJETIVO .....	3
2. ALCANCE .....	3
3. REFERENCIAS .....	3
4. NOMENCLATURA .....	3
5. UNIDADES (SI) .....	4
6. EQUIPAMIENTO E INSTRUMENTAL UTILIZADO .....	4
7. ENSAYO DE PELLETIZADO .....	5
7.1. Recepción .....	5
7.2. Caracterización .....	5
7.3. Adecuación .....	6
7.4. Pelletizado .....	8
7.5. Caracterización del producto final .....	10
7.6. Evaluación del proceso .....	11
8. CORRECCION Y RECOMENDACIONES PARA EL PROCESO INDUSTRIAL .....	12
7.7. Consideraciones .....	12
8.1. Desviaciones del procedimiento .....	13
8.2. Recomendaciones .....	13
8.3. Diagrama de flujo recomendado .....	14
9. RESPONSABLES Y CONTACTO .....	14

## Tablas

Tabla 1 - Medición de caudal Q(66) .....	8
Tabla 2 - Caudal máxico Q(40) .....	8
Tabla 3 - Condiciones de ensayo .....	8
Tabla 4 - Datos de consumo de energía en acondicionamiento .....	8
Tabla 5 - Datos del ensayo de pelletizado .....	9
Tabla 6 - Muestras de referencia .....	9
Tabla 7 - Muestra N°1 .....	10
Tabla 8 - Muestra N°2 .....	10
Tabla 9 - Muestra N°3 .....	10
Tabla 10 - Rendimiento de MP .....	11
Tabla 11 - Energía entregada en el proceso de pelletizado .....	11

## Ilustraciones

Ilustración 1 - Diagrama recomendado de aprovechamiento .....	14
---	----

# Ensayo Industrial de Rendimiento de Biomasa en Proceso de Conformado de Pellets

## 1. OBJETIVO

El objetivo del ensayo fue analizar el comportamiento de la "*Spartina Argentinensis*" ante el proceso INDUSTRIAL de conformado de pellets y sus operaciones de adecuación para alcanzar los valores mínimos aceptables por los diferentes equipos que integran la planta demostrativa de pelletizado INTI. REFERENCIAS. El fin último de un ensayo industrial es la caracterización de las variables intrínsecas a la biomasa objetivo para poder proyectar futuros procesos o modificaciones del utilizado para aprovechar el recurso a través del densificado con fines energéticos o como producto de mayor valor agregado.

## 2. ALCANCE

Todas las tareas descriptas en este documento y los resultados obtenidos corresponden a un ensayo industrial cuyas limitantes son propias del equipamiento disponible (véase equipamiento utilizado), es decir, producción, tipo de prensa, sistemas de acondicionamiento, etc.

En el mercado existen diferentes tecnologías de densificado con fines energéticos o como producto, que funcionan con diversas biomásas, por lo cual este ensayo no invalida otros resultados que pueden obtenerse con tecnologías equivalentes. Las actividades realizadas para alcanzar estos resultados siempre dependen de la complejidad de la forma física de la energía primaria.

## 3. REFERENCIAS

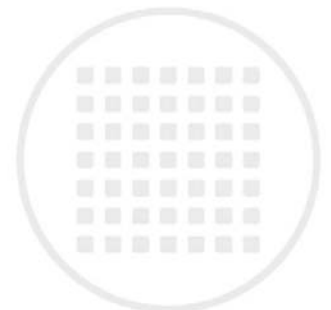
Para realizar el ensayo se toman de referencias los siguientes documentos:

- **Procedimiento Interno N°VRB-P-PPA01:** de caracterización previa de la biomasa.
- **Procedimiento Interno N°VRB-P-PPA02:** herramientas metodológicas de relevamiento y toma de datos durante las pruebas realizadas.
- **Procedimiento Interno N°VRB-P-TPA02:** Ensayo de calidad de pellets en base a la Normativa Europea EN14961

La operación de los equipos se realiza con soporte de los operarios quienes cuentan con más de 4 años de experiencia en producción y puesta a punto de la instalación.

## 4. NOMENCLATURA

- **VRB:** Valorización de recursos biomásicos
- **PER:** Programa de Energías Renovables
- **PDP:** Complejo Demostrativo de Biomasa en Presidencia de la Plaza.
- **PPA:** Planta Pelletizadora de Aserrín
- **Pellet:** Pellet o pelet es una denominación genérica, utilizada para referirse a pequeñas porciones de material aglomerado o comprimido. El término es utilizado para referirse a diferentes materiales, en nuestro contexto siempre se hará referencia a biomasa.



- **Matriz:** anillo de acero especial de gran diámetro que cuenta con una pista interior perforada para comprimir la materia prima expeliendo los pellets por su periferia a medida que gira y en contacto con rodillos compresores interiores que funcionan como planetario.
- **Rodillos:** componentes mecánicos (x2) fijos que en conjunto con la matriz rotativa generan el flujo y la compresión en los intersticios empujan a la materia prima por los orificios en la matriz.
- **Acondicionador:** sistema de homogenización y humidificación de materia prima antes de la entrada a la prensa.
- **MM:** Molino de martillo, equipo que muele o tritura la biomasa preseleccionada en cierto tamaño para refinar el producto entregando material apto para pelletizar.
- **CEA:** Costo energético de aprovechamiento, es un indicador de la relación energía contenida en la materia vs. la energía utilizada para transformarla en un biocombustible o aprovecharla energéticamente.

## 5. UNIDADES (SI)

Variable	Denom.	Unidad	Símbolo
Dimensión (longitud, diámetro, altura)	L, D, H	Milímetros, metros	[mm],[m]
Volumen	V	Metro cúbico, litros	[m³], [ltrs]
Peso	P	Gramo, kilogramo, tonelada	[g], [kg], [t]
Densidad	$\rho$	Kilogramo por metro cúbico	[kg/m³]
Densidad aparente	$\rho_a$	Kilogramo por metro cúbico	[kg/m³]
Poder Calorífico superior	PCS	Kilocaloría por kilogramo	[Kcal/kg]
Poder Calorífico Inferior	PCI	Kilocaloría por kilogramo	[Kcal/kg]
Densidad energética	$\rho_e$	Kilocaloría por metro cúbico	[Kcal/m³]
Tiempo	t	Hora, minuto, segundos	[hr], [min], [seg]
Caudal másico	Qm	Kilogramos por hora	[kg/hr]
Potencia eléctrica	P	Kilowatio, horse power	[Kw], [HP]
Potencia térmica	Pt	Kilowatio térmico	[Kwt]
Frecuencia	F	Hertz	[hz]
Temperatura	T	Grados centígrados	[°C]
Velocidad angular	w	Revoluciones por minuto	[rpm]
Corriente eléctrica	I	Amperios	[A]
Voltaje	V	Voltios	[V]

## 6. EQUIPAMIENTO E INSTRUMENTAL UTILIZADO

(Ver anexo I - Equipamiento e instrumental utilizado)

## 7. ENSAYO DE PELLETIZADO

Para poder cuantificar las variables del proceso se requiere en primer término una caracterización de la biomasa como lo estipula el procedimiento VRB-P-PPA01 el cual prevé realizar un control visual de la materia prima y medir humedad como así también densidad aparente.

### 7.1. Recepción

#### ➤ Control Visual

La recepción de la biomasa fue una semana previa al ensayo. Dado los volúmenes se resguardó bajo techo pero fuera del hangar principal. Luego de un análisis previo se determinó que se requeriría un picado previo para poder alimentar los sistemas en planta por el largo de las fibras que en promedio alcanzaba los 70[cm].

### 7.2. Caracterización

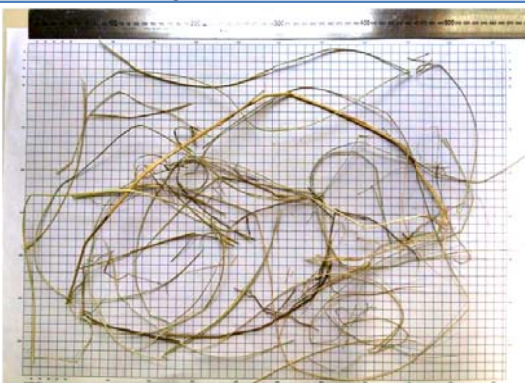
CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA RECIBIDA EN PPA			
Variable	Valor	Unidad	Observación
Nombre Científico	Spartina Argentinensis	-	
Denominación	Espartillo	-	
Formato de Recepción	Rollos	-	Tradicionales para herbáceas.
Humedad:	38	[%]	
Cantidad	40	[und]	
Peso por Unidad	50	[kg]	Promedio
Densidad Aparente	~29 (en rollo)	[kg/m³]	
Poder Calorífico	4446	[kcal/kg]	Valor de referencia UNR

Imagen 1 - Registro de recepción




### 7.3. Adecuación

#### ➤ Primera Transformación

Caracterización de Biomasa 1ª Transformación			
Variable	Valor	Unidad	Observación
Humedad	38	[%]	Sin variación
Densidad Aparente	invariable	[kg/m³]	
Tamaño	15-70	[mm]	
Proceso y comportamiento	Picado c/máquina IRALOF Mod. 0,5[HP] sin malla interior. Solamente presenta una limpieza general pero sin cambio de su comportamiento a granel.		
Imagen 2 - Picado inicial			
			

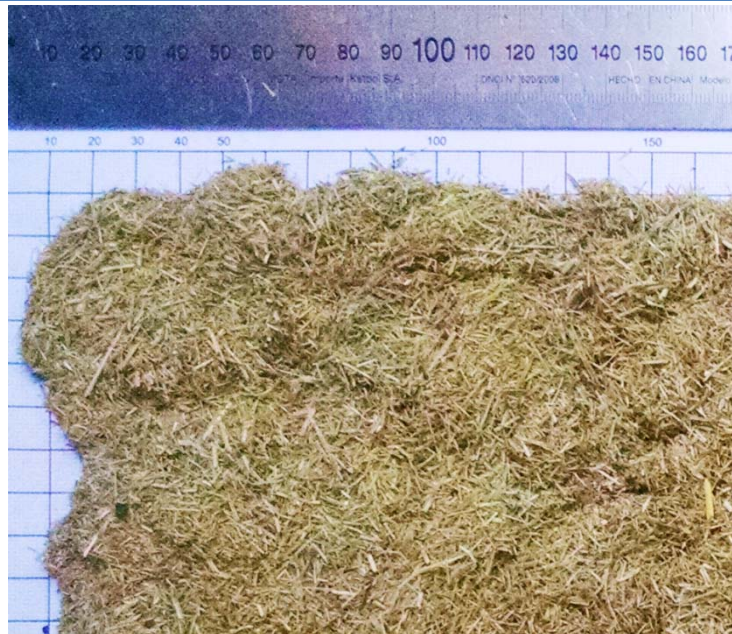
#### ➤ Segunda Transformación

Caracterización de Biomasa 2ª Transformación			
Variable	Valor	Unidad	Observación
Humedad:	18	[%]	
Densidad Aparente	66,9	[kg/m³]	
Tamaño	25-50	[mm]	Con mucho polvo volátil.
Proceso y comportamiento	Picado c/máquina IRALOF Mod. 2[HP]. Mejora su manejo a granel pero se tiende a incrustar formando abovedados en su acopio en altura.		
Imagen 3 - Picado con zaranda			
			

➤ Tercera Transformación

Caracterización de Biomasa 3ª Transformación				
Variable		Valor	Unidad	Observación
Humedad	Luego del picado	22	[%]	
	Secado al sol	~13	[%]	
Densidad Aparente		~170	[kg/m³]	Tres mediciones en promedio.
Tamaño		0,2-0,5	[mm]	Con mucho polvo volátil.
Proceso y comportamiento		Mejora significativa en el manejo a granel sin atascamiento ni abovedado. El equipo de alimentación del molino de martillo lo puede dosificar.		

Imagen 4 - Molido fino



**Notas:** en la etapa de prueba y durante el refinado en la tercera etapa de adecuación surgieron inconvenientes propios de la diferencia física entre la biomasa objetivo y la original para la cual fue diseñada la PPA. Algunos de los problemas detectados fueron:

- Deficiencia en el transporte por parte de la cinta de alimentación.
- Bajo control de las roscas dosificadoras, por lo que había que realizarse un control manual para mantener constante la alimentación al molino de martillo.
- Atascamiento del material en los extremos de los alimentadores a rosca.
- Excesiva generación de polvillo.

Una vez solucionados los problemas mediante un mantenimiento constante y control fino del proceso se logró una materia prima apta para pelletizar.

Luego de **Molido**, se observó un incremento en su humedad superficial debido a la ruptura de las fibras y su homogeneización granulométrica. En un mismo lote medido, el material presentó una humedad del 17% luego de ser picada y una humedad del 22% luego de ser molida.

#### 7.4. Pelletizado

Para realizar las pruebas de conformado del pellet se debió asegurar un control efectivo del transporte de la biomasa, es decir, se tuvo que regular la alimentación que recibía la matriz para asegurar parámetros importantes. De esta manera se hizo circular el material molido a través del proceso y se fueron tomando medidas del caudal másico Q al cual se alimentaba a la matriz, considerando diferentes velocidades del dosificador (alimentador).

Los datos de la siguiente tabla se obtuvieron a una velocidad del alimentador de 66[hz], máxima velocidad que alcanza.

**Tabla 1 - Medición de caudal Q(66)**

Volumen [Ltrs]	Peso [kg]	Tiempo [seg]	Tiempo [hr]	Caudal [kg/h]
3,0	0,524	3,74	0,00103	505
*Medición de peso en proceso				

Los siguientes datos se obtuvieron bajando las rpm de 66 a 40 y una humedad del 10[%]

**Tabla 2 - Caudal másico Q(40)**

Volumen [Ltrs]	Peso [gr]	Tiempo [seg]	Tiempo [hr]	Caudal [kg/h]
3,0	0,525	6,17	0,00171	306
* Única medición de peso en proceso				

**Tabla 3 - Condiciones de ensayo**

Variable	Valor	Observación
Hora de inicio	14:45	Sin considerar la adecuación previa ni la puesta en marcha de la matriz (15 minutos de pre-calentamiento)
Hora de finalización	15:11	
Tiempo de ensayo	26,5 [min]	Hasta finalizar el procesamiento del batch.
Cantidad de biomasa procesada	303 [kg]	Total de materia prima picada, secada y pelletizada.
Humedad de inicio	12-14[%]	Medida con higrómetro de contacto .
Densidad materia prima	165 [kg/m <sup>3</sup> ]	Tomada antes de comenzar.
Pellet producido	196 [kg]	Embolsado en 7 bolsas de aprox. 30[kg]

**Tabla 4 - Datos de consumo de energía en acondicionamiento**

Proceso	Variable	Pre-proceso	Pos-proceso	Caudal de trabajo [Kg/Hs]	Tiempo de Trabajo [Hs]	Pot.total entregada [kwh]
Acondicionado	Densidad aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	~ 29 (en rollo)	170	Max: 18 Min: 10	24	45
	Humedad [%]	30-38	18-22			
Secado y ventilado	Densidad aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	66,9	66,9	~20	~12	25,6
	Humedad [%]	22	10-12			

**Tabla 5 - Datos del ensayo de pelletizado**

Paso	Frecuencia del alim. [hz]	Caudal de Alimentación [kg/h]	Tiempo [min]	Humidificador ap. de valv. [°]	Corriente Prensa [A]	Corriente MM [A]	Potencia entregada [kW]	Cantidad de Producto [kg]	Observación
1	25	167	0,50	0	55	35	31,5	1,39	Insuficiente alimentación- Sin pelletizado
2	30	230	0,50	0	60	35	33,2	1,92	Insuficiente alimentación- Sin pelletizado
3	35	268	0,50	0	65	35	35,0	2,23	Insuficiente alimentación- Sin pelletizado
4	40	306	1,00	45°	67	35	35,7	5,10	Insuficiente alimentación- Pellet defectuoso
5	50	382,5	4,00	45°	70	35	36,7	25,50	Suficiente alimentación – Pellets OK
6	60	460	5,00	45°	70	35	36,7	38,33	Suficiente alimentación – Pellets OK
7	66	505	15,00	45°	75	35	38,5	126,25	Suficiente alimentación – Pellets OK
<b>Tiempo Total Ensayo</b>			<b>26,50</b>	<b>Producto + Material de puesta a punto</b>			<b>Total</b>	<b>200,725</b>	<b>98%</b>

**Notas:**

La válvula del humidificador es de apertura total a 90[°] entregando un caudal en apertura total de 10,75[ltrs/hr]. La temperatura del pellet a la salida fue de aproximadamente 80[°C]

Para el análisis de la calidad del pellet obtenido se separan tres muestras del producto obtenido:

**Tabla 6 - Muestras de referencia**

N°	Frecuencia de Alimentación [Hz]	Caudal de alimentación [kg/h]
M1	40	306
M2	50	382,5
M3	66	505



## 7.5. Caracterización del producto final

El producto terminado tienen las siguientes características de acuerdo al Procedimiento VRB-P-PPA02 de calidad de Pellet basado en la **Normativa Europea EN14961**

### ➤ Muestra 1

Tabla 7 - Muestra N°1

Propiedad	Unidades	Valor Ref. Norma EN 14961-1	Valor	Imagen
Longitud promedio (L)	[mm]	$3,15 \geq L \geq 40$	11,2	
Clase de diámetro (D)	[mm]	$6(\pm 1) \text{ u } 8(\pm 1)$	6,4	
Humedad	[%]	$\leq 10$	10	
Densidad (BD)	[kg/m <sup>3</sup> ]	$\geq 600$	720	
Durabilidad mecánica (DU)	Peso-% a.r.	$\geq 97,5$	98,8	
Finos, F (< 3.15 mm)	Peso-% a.r.	<1	0,9	
Clase*	ENplus-A1			

### ➤ Muestra 2

Tabla 8 - Muestra N°2

Propiedad	Unidades	Valor Ref. Norma EN 14961-1	Valor	Imagen
Longitud promedio (L)	[mm]	$3,15 \geq L \geq 40$	12,1	
Clase de diámetro (D)	[mm]	$6(\pm 1) \text{ u } 8(\pm 1)$	6,4	
Humedad	[%]	$\leq 10$	10	
Densidad (BD)	[kg/m <sup>3</sup> ]	$\geq 600$	755,0	
Durabilidad mecánica (DU)	Peso-% a.r.	$\geq 97,5$	99,2	
Finos, F (< 3.15 mm)	Peso-% a.r.	<1	0,5	
Clase*	ENplus-A1			

### ➤ Muestra 3

Tabla 9 - Muestra N°3

Propiedad	Unidades	Valor Ref. Norma EN 14961-1	Valor	Imagen
Longitud promedio (L)	[mm]	$3,15 \geq L \geq 40$	13,9	
Clase de diámetro (D)	[mm]	$6(\pm 1) \text{ u } 8(\pm 1)$	6,4	
Humedad	[%]	$\leq 10$	10	
Densidad (BD)	[kg/m <sup>3</sup> ]	$\geq 600$	798,3	
Durabilidad mecánica (DU)	Peso-% a.r.	$\geq 97,5$	99,6	
Finos, F (< 3.15 mm)	Peso-% a.r.	<1	0,5	
Clase*	ENplus-A1			

\* Ref. Pellets de Madera para Usos Térmicos (EN 14961-1)

## 7.6. Evaluación del proceso

### I. Rendimiento de materia prima

Para calcular los rendimientos en aprovechamiento de la materia prima se toman en cuenta los pesos de la misma como se la recibió versus el producto final ya estabilizado considerando su base seca, no la pérdida de humedad.

Tabla 10 - Rendimiento de MP

Variable	Valor, (CH[%])	Unidad	Observación
Cantidad de rollos	5	[und]	
Peso por rollo	~46,5	[kg]	
Peso total materia prima	~303 (38)	[kg]	Las pérdidas de materia se produjo durante la segunda transformación en su manipuleo.
Total de biomasa sin procesar	8,5	[kg]	
Peso total de pellets producidos	200,8 (10)	[kg]	Pesado en balanza en planta. Considerando la pérdida de humedad.

$$\eta_{mpbs} = \frac{P_{\text{total pellets}} + \text{Materia sin procesar}}{P_{\text{Peso total m.p.}}}$$

$$\eta_{mpbs} = 0,94 \text{ en base seca}$$

### II. Consumos de energía y Costo de aprovechamiento energético (CAE)

Para evaluar el rendimiento energético de pellet se consideran los ingresos adicionales de energía tanto en el proceso de secado como en el conformado del mismo.

Tabla 11 - Energía entregada en el proceso de pelletizado

Paso	Tiempo [min]	Caudal de Alimentación [kg/h]	Potencia entregada [kW]	Energía entregada [kcal/kg]	Energía entregada por hora [kcal/hr]	Observaciones
7	10:00	505	38,5	65,5	33077,5	Sin considerar los componentes adicionales como el ventilador que se mantuvo fuera de operación para evitar arrastre de partículas.

Considerando este caso particular cuyo proceso se hizo a una tasa entre 10 y 20[kg/hr] para el picado, secado y 1,5[kg/hr] para el molido (acondicionamiento) con las máquinas IRALOF y el MM de PPA.

$$E_{\text{Acond.}} = E_{\text{picado}} + E_{\text{secado}} + E_{\text{molido}}$$

$$E_{\text{picado}} = 45[\text{kWh}] \text{ en } 24[\text{hrs}]$$

$$E_{\text{secado}} = 25,6[\text{kWh}] \text{ en } 12[\text{hrs}]$$

$$E_{\text{molido}} = 18,6[\text{kWh}] \text{ en } 1,5[\text{hrs}]$$

**Nota:** el secado se realizó al sol en mallas aireadas.

El costo energético del aprovechamiento nos da una idea de la **energía requerida** para obtener un producto aceptable de acuerdo a las normas (desde el punto de vista físico) frente a la **energía contenida en la materia prima inicial** (energía primaria).

Consideramos el paso 7 del proceso continuo en el cual se considera un consumo energético adicional de los sistemas auxiliares (transporte, ventiladores, bombas, etc.).

Costo energético del aprovechamiento (CEA) para este proceso será:

$$CEA_{(7)} = \frac{E_{\text{proceso}}}{E_{\text{mp}}} = \frac{E_{\text{acond}} + E_{\text{pelletizado}} + E_{\text{sistemas aux.}}}{E_{\text{mp}}} = 0,0263$$

$$CEA_{(7)} = 2,63\%$$

**CEA<sub>(7)</sub>**: costo energético del aprovechamiento en el punto de régimen (7).

**E<sub>mp</sub>**: Energía contenida en la materia prima.

**E<sub>acond.</sub>**: Energía entregada en el acondicionado.

**E<sub>pelletizado</sub>**: Energía utilizada en el conformado de pellet.

**E<sub>sistemas aux.</sub>**: Energía utilizada en los sistemas auxiliares como el transporte y la eliminación de finos.

**Nota:** Se considera el PCI provisto por la Universidad Nacional de Rosario desde la Facultad de Ciencias Agrarias. Los valores son indicadores del aprovechamiento energético teórico ya que los INPUT de energía pueden ser de diferentes fuentes con costos asociados distintos. Para el caso de secado al sol, resulta económico pero demasiado lento en comparación a la tasa de producción alcanzada lo que da un rendimiento ficticio para el aprovechamiento industrial.

## 8. CORRECCION Y RECOMENDACIONES PARA EL PROCESO INDUSTRIAL

A continuación se listan las observaciones del equipo técnico para la proyección de un sistema de pelletizado para el aprovechamiento de *Spartina Argentinensis* a escala industrial:

### 7.7. Consideraciones

- **E<sub>secado</sub>**: En caso de igualar las tasas de procesamiento con el consumo de pelletizado nominal de 505[kg/hr] al 10% de contenido de humedad, deberíamos evaporar 278[ltrs/hr] de agua por lo que requeriríamos 350[kWt] adicionales aproximadamente para secar considerando un proceso de secado con un 50[%] de eficiencia.
- **E<sub>picado</sub>**: Para el caso del picado se necesitaría un equipo de iguales características del molino de martillo que consume como mínimo 18[kW]

En este caso nos quedaría:

La energía útil por unidad en peso de materia prima sería:

$$E_{\text{Acond.}} = E_{\text{picado}} + E_{\text{secado}} + E_{\text{molido}}$$

$$E_{\text{picado.}} = 18[\text{kW}] = 15480[\text{kcal/hr}]$$

$$E_{\text{secado}} = 350[\text{kW}] = 300240[\text{kcal/hr}]$$



Costo energético del aprovechamiento (CEA) para este proceso será:

$$CEA_{(7)} = \frac{E_{\text{proceso}}}{E_{\text{mp}}} = \frac{E_{\text{acond}} + E_{\text{pelletizado}} + E_{\text{sistemas aux.}}}{E_{\text{mp}}} = 0,1676$$

$$CEA_{(7)} = 16,26[\%]$$

$CEA_{(7)}$ : costo energético del aprovechamiento en el punto de régimen (7).

$E_{\text{mp}}$ : Energía contenida en la materia prima.

$E_{\text{acond}}$ : Energía entregada en el acondicionado.

$E_{\text{proceso}}$ : Energía utilizada en el conformado de pellet.

### 8.1. Desviaciones del procedimiento

Como le estipula el alcance del ensayo las actividades realizadas para alcanzar estos resultados siempre dependen de la complejidad de la forma física de la materia prima que en este caso y como caso particular para este usuario (La Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario) se realizaron con personal INTI en vista de la conformación de un convenio de colaboración mutua, ya que normalmente se pediría cumplir con las condiciones elementales previas por parte del usuario solicitante.

### 8.2. Recomendaciones

Recomendaciones generales para el proceso:

- **Densidad de trabajo:** para poder llegar a una calidad de pellet dentro de norma se requiere llevar la biomasa a por lo menos 160[kg/m<sup>3</sup>]
- **Adecuación:** se recomienda incorporar un sistema de picado por molino de martillo de por lo menos 24kw] adaptado para procesar la biomasa en su condición natural para evitar atascamientos. Es probable que se requiera un control de humedad para el picado.
- **Secado:** La biomasa libera fácilmente la humedad por lo cual la dificultad de diseño de un secadero, es menor y la energía necesaria puede ser provista con una alta eficiencia.
- **Manejabilidad:** el manejo en fardo es muy tedioso y requiere operaciones manuales excesivas, se debe mejorar la misma o evaluar otra forma de acopio o preparación previa al picado.
- **Alimentación:** al trabajar con biomasa de baja densidad se deben hacer pruebas de corrientes de aire para no arrastrar materia prima, solo el polvillo indeseable.
- **Control de finos:** Al trabajar con la biomasa seca se produce una excesiva generación de polvillo que debe ser considerada tanto para el proceso como para la HySL de los operarios. Incorporar sistema de aspiración. En cuanto al proceso la extracción de finos debe ser controlada siendo de menor potencia que para el aserrín ya que la biomasa tiene una densidad aparente menor.
- **Composición química:** Si bien la factibilidad de pelletizado está probada, para introducir este producto en el mercado energético, se requieren pruebas de su composición química elementales (CHONS) y de combustión para proponer mejoras o modificaciones a los componentes metálicos de los sistemas de combustión, en el caso de tener una excesiva generación de cenizas o componentes corrosivos.

### 8.3. Diagrama de flujo recomendado.

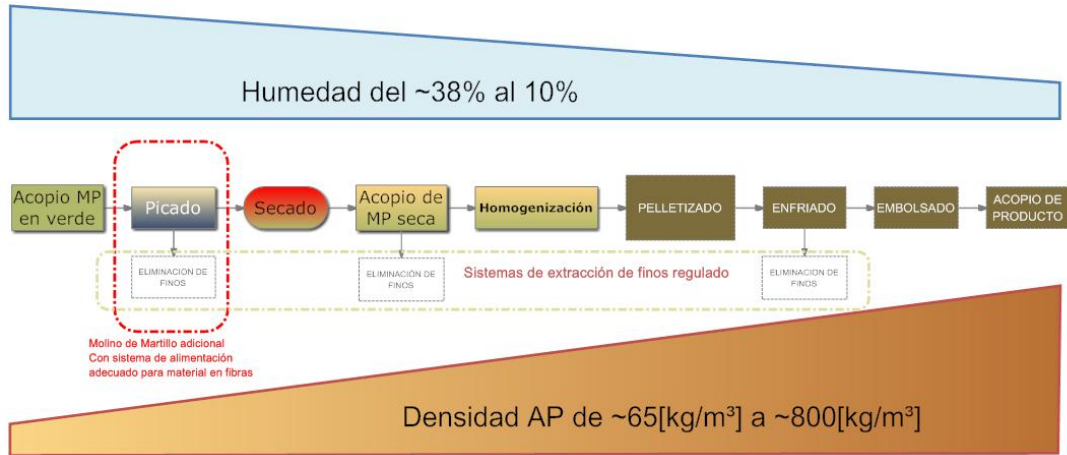


Ilustración 1 - Diagrama recomendado de aprovechamiento

### 9. RESPONSABLES Y CONTACTO

**INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL**  
Centro de Investigación y Desarrollo, INTI - Tucumán

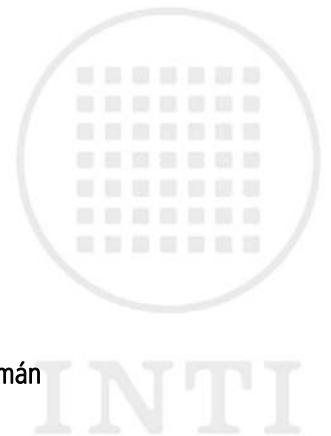
**Valorización de Recursos Biomásicos**  
Charcas 21, Predio Ferial Norte, Nave "D"  
San Miguel de Tucumán  
Tel. (0381) 4228410  
[tucuman@inti.gob.ar](mailto:tucuman@inti.gob.ar)

**Responsables de ensayo**  
Valorización de Recursos Biomásicos

**ING. MARTIN REARTE**  
[mrearte@inti.gob.ar](mailto:mrearte@inti.gob.ar)

**ING. GUILLERMO MARTÍNEZ PULIDO**  
[guimar@inti.gob.ar](mailto:guimar@inti.gob.ar)

**ING. JULIO AGNELLO**  
[jagnello@inti.gob.ar](mailto:jagnello@inti.gob.ar)  
Director Centro INTI Tucumán



0800 444 4004 | [www.inti.gob.ar](http://www.inti.gob.ar)

Codificación <b>VRB102-1401</b>	Este documento se ha elaborado con recursos del Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Queda prohibido su uso o reproducción sin autorización Régimen Legal de la Propiedad Intelectual LEY 11.723.	Realizó:	MR, GMP	Revisó:	JA	Aprobó:	JA
		Fecha:	26/05/2015	Fecha:	04/08/2015	Fecha:	20/08/2015