

Ingeniería en Recursos Naturales Renovables
Facultad de Ciencias Agrarias – Universidad Nacional de Cuyo

Tesina de Grado

**“Fijación y balance de dióxido de carbono y
elaboración de función estimadora de biomasa
en un cultivo energético de álamo ‘Conti 12’,
Perdriel, Mendoza”**



Tesista: Noel Alcover

Director: Dr. Juan Alberto Bustamante

Mendoza, Argentina

2013

A mi abuelo,
porque sé que lo haría feliz.

Agradecimientos

- A mi Director de Tesis, Juan, por su tiempo, apoyo, buena predisposición y conocimientos brindados.
- A la Cátedra de Química Agrícola y de Edafología por la ayuda brindada y por permitirme realizar los análisis en sus laboratorios.
- A Joaquín Llera por su tiempo, y por la ayuda brindada en la realización de este trabajo.
- A mi Familia, todos ellos, por su acompañamiento, cariño y apoyo incondicional. Sin ellos esto no hubiera sido posible. Gracias.
- A mis amigos, por su compañía y apoyo. A Betty por acompañarme y ayudarme en las salidas a campo y a lo largo de esta carrera, gracias. También un “gracias” especial para Agus y Alisa, por las tardes que nos pasamos “teseando” y por las bellas personas que son. Y a “Gauna” por acompañarme en esta etapa.

ÍNDICE

Resumen.....	5
1. Introducción.....	6
1.1 Situación energética actual y medidas de mitigación para las emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial.....	6
1.2 Bioenergía y cultivos energéticos.....	7
2. Fundamentación, Hipótesis y Objetivos.....	12
2.1 Fundamentación.....	12
2.2 Hipótesis.....	13
2.3 Objetivos.....	13
3. Antecedentes.....	15
4. Caracterización del área de estudio y ubicación geográfica.....	24
4.1 Ubicación geográfica.....	24
4.2 Clima.....	25
4.3 Agua.....	27
4.4 Suelo.....	28
5. Materiales y Métodos.....	33
5.1 Material vegetal utilizado y manejo de la parcela.....	33
5.2 Metodología de trabajo.....	34
5.2.1 Muestreo a Campo.....	34
5.2.2 Procesamiento de datos y muestras.....	35
6. Resultados.....	41
6.1 Datos generales del cultivo.....	41
6.2 Función alométrica o estimadora de biomasa.....	42
6.2.1 Representación gráfica del modelo.....	42
6.3 Carbono presente en la biomasa y dióxido de carbono fijado por el cultivo.....	43
6.4 Carbono presente en el suelo.....	45
6.5 Balance de dióxido de carbono.....	46
7. Discusión.....	47
8. Conclusiones.....	51
Anexos.....	53
Anexo I Clasificación de RIVERSIDE (U.S.) sobre peligro de salinización de agua.....	54
Anexo II Clasificación de los suelos de Luján de Cuyo según Soil Taxonomy.....	55
Anexo III Análisis estadístico (salida del software InfoStat).....	56
Anexo VI Referencias sobre unidades, símbolos y siglas.....	57
Bibliografía.....	58

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Carbono presente en las distintas partes una la planta perteneciente a un cultivo de sauce para obtención de biomasa.....	18
Tabla N° 2: Distribución del carbono presente en los depósitos del bosque de pino-encino dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas.....	21
Tabla N° 3: Temperaturas medias anuales, Estación Meteorológica de Perdriel, Mendoza.....	26
Tabla N° 4: Precipitaciones medias anuales, Estación Meteorológica de Perdriel, Mendoza....	26
Tabla N° 5: Análisis diagnóstico de salinidad y sodicidad del agua de riego del cultivo, distrito de Perdriel, Mendoza	28
Tabla N° 6: Análisis de salinidad, fertilidad y textura de una muestra de suelo del área de estudio, distrito Perdriel	30
Tabla N° 7: Valores mínimos, promedio y máximos del diámetro base (mm) de los brotes, el número de estos por planta y su altura (cm).....	41
Tabla N° 8: Valores mínimos, promedio y máximos del peso seco (kg ms.pl-1) correspondiente a las distintas fracciones analizadas de la planta (brote, raíz y tocón).....	41
Tabla N° 9: Porcentaje de materia seca de cada fracción de la planta (brote, raíz, tocón) con respecto al peso seco total promedio por planta (kg ms.pl ⁻¹).	41
Tabla N° 10: Producción total de biomasa (t ms.ha ⁻¹) en función de la densidad del cultivo.	42
Tabla N° 11: Producción de biomasa de brotes, raíz y tocón (t ms.ha ⁻¹).....	42
Tabla N° 12: Porcentaje de carbono presente en brote, tocón y raíz.	43
Tabla N° 13: Cantidad de carbono presente en la biomasa (tC.ha ⁻¹) y de dióxido de carbono fijado (tCO ₂ fijado.ha ⁻¹) por el cultivo y por las distintas fracciones de la planta.	44
Tabla N° 14: Porcentaje de materia orgánica y de carbono presente en el suelo del cultivo de `Conti 12` y en una parcela inculca.....	45
Tabla N° 15: Toneladas de carbono (tC.ha ⁻¹) y dióxido de carbono (tCO ₂ .ha ⁻¹) presentes en el suelo del cultivo.....	45
Tabla N° 16: Balance de la toneladas de dióxido de carbono fijado por el sistema y las emitidas por la biomasa utilizable (tCO ₂ .ha ⁻¹).....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Matriz energética de Argentina.....	6
Figura N° 2: Mapa de la Provincia de Mendoza, del departamento Luján de Cuyo y el distrito de Perdriel.....	24
Figura N° 3: Clasificación taxonómica de suelos de Mendoza.....	29
Figura N° 4: Marco de plantación utilizado en las parcelas del cultivo de `Conti 12`	33
Figura N° 5: Relación entre diámetro base (mm) y Peso fresco real (kg).....	42
Figura N° 6: Relación entre el diámetro de base (mm) de brotes de Conti 12, con su correspondiente peso fresco (kg).....	43
Figura N° 7: Porcentaje de dióxido de carbono fijado por cada fracción del cultivo (brote, raíz y tocón) en una superficie de una hectárea.....	44
Figura N° 8: Porcentaje de carbono presente en el suelo del cultivo y en suelo inculca.....	45

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

Resumen

Como consecuencia del Protocolo de Kyoto, se han desarrollado políticas que promueven el uso de energías renovables, que conlleven una disminución del CO₂ emitido a la atmósfera. La biomasa proveniente de cultivos energéticos con forestales, se presenta como una alternativa.

Estos cultivos pueden afectar las emisiones netas de CO₂ de dos maneras: suministrando energía que sustituya la de los combustibles fósiles y modificando la cantidad de carbono capturado en el sistema del cultivo.

Ante la falta de información sobre este tema en la región, se planteó como objetivo general cuantificar el carbono almacenado en la biomasa y en el suelo de un cultivo energético de álamo `Conti 12´ de dos años de edad y realizar el balance entre el CO₂ fijado por el cultivo y el liberado por combustión de la biomasa utilizable (brotes). También, se propuso realizar una función estimadora de biomasa (alométrica) que cuantifique el peso fresco de la fracción de brotes del cultivo.

Para esto, se determinó peso fresco y seco (kg) de la biomasa utilizable y de la biomasa remanente (raíces y tocón) y, además, el carbono presente en cada una de las partes. Para la realización de la función alométrica se utilizó el diámetro de base de los brotes y el peso fresco de los mismos. Luego se calculó el CO₂ fijado por el cultivo y el liberado por la fracción utilizable del mismo, determinándose por último el balance de CO₂.

El modelo alométrico que se obtuvo fue $PF = 0,098 - 0,016 \cdot Db + 0,001 \cdot Db^2$ ($R^2 = 0,99$; $n = 73$), siendo el que mejor se ajustó para ese sitio. La biomasa seca total del cultivo, estimando un 15% de fallas, fue de 20,5 tms.ha⁻¹, correspondiendo 10,1 tms.ha⁻¹ a la biomasa utilizable y 10,4 tms.ha⁻¹ a la biomasa remanente. El porcentaje de carbono en la biomasa seca de raíz, tocón y brotes fue de 53%, 54% y 56% respectivamente. A partir de estos datos, el balance de CO₂ indicó que permanecen fijados en el sistema 20,5 tCO₂.ha⁻¹. En cuanto a la cantidad de carbono en el suelo, el valor calculado fue de 40,5 tC.ha⁻¹.

Palabras clave: cultivos energéticos, biomasa, fijación de carbono, función estimadora de biomasa.

1. Introducción

1.1 *Situación energética actual y medidas de mitigación para las emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial.*

Como consecuencia del Protocolo de Kyoto, las partes que lo conforman han buscado soluciones al problema de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, causante, entre otros, del efecto invernadero. Uno de los artículos del Protocolo expresa que aquellos países que se hayan adherido al mismo tendrán que aplicar y/o seguir aplicando políticas de investigación, promoción, desarrollo y aumento del uso de formas nuevas y renovables de energía (Naciones Unidas, 1998), entre otras aspiraciones relacionadas con la disminución del CO₂.

Si bien Argentina no forma parte de los países que emiten gran cantidad de gases de efecto invernadero, con una utilización actual de 42% de petróleo y un 48% de gas natural (Di Sbroiavacca, 2008), sufre una disminución de las reservas petroleras y gasíferas tradicionales, importantes en la matriz energética del país. Esta disminución crea la necesidad de búsqueda de nuevas fuentes de energía que a la vez no incrementen de forma neta, la emisión de gases de efecto invernadero, o aquellas que contribuyan a mitigar sus efectos. De aquí surgen las energías renovables, que tienen como aspiraciones ayudar a sobrellevar los precios crecientes de las fuentes de energía convencional, abordar las inquietudes medioambientales sobre emisiones de gases de efecto invernadero y ofrecer nuevas fuentes de ingresos y trabajo a los agricultores y comunidades rurales en todo el mundo (IFPRI, 2006).

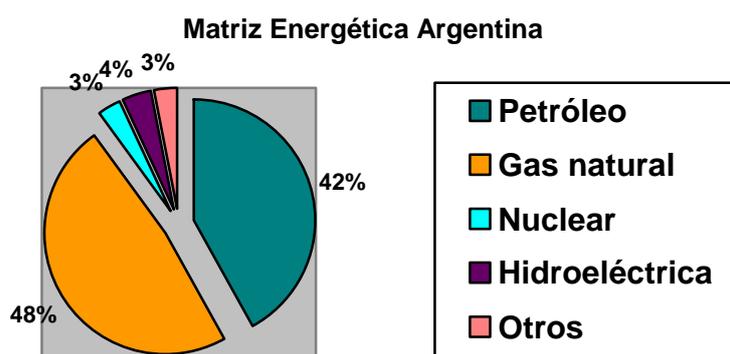


Figura N° 1: Matriz energética de Argentina. Fuente: Necesidades y desafíos energéticos de la República Argentina, Di Sbroiavacca N. Año 2008.

Dentro de las energías renovables se puede mencionar aquella producida a partir de biomasa forestal proporcionada por cultivos energéticos. La energía producida a partir de este tipo de materia prima se denomina bioenergía.

El uso actual de bioenergía se distingue del uso tradicional de biomasa (combustión de leña en el hogar) en que presenta mayor eficiencia en la conversión y una mejor calidad en los productos de entrega de los servicios energéticos. El uso tradicional de la biomasa sólida como combustible presenta dificultades en el control del calor. La tecnología moderna de bioenergía es más versátil y controlable. Es más probable que la producción de bioenergía con la nueva tecnología sea sostenible a largo plazo en comparación con los usos tradicionales, debido a los ahorros en la tierra, el agua y otros recursos como resultado de una mayor eficiencia en la producción de biomasa y una mayor precisión en el cumplimiento de la demanda de servicios energéticos para los diferentes usuarios (FAO, 2010).

Frente a un panorama complicado en Argentina, en cuanto a la generación y provisión de energía para atender la demanda creciente de la última década, se propone reemplazar rápidamente parte de su consumo eléctrico con energías renovables y, en el largo plazo, asegurarse la totalidad de su energía de fuentes alternativas. Por esto, el Gobierno anunció recientemente el Proyecto PROBIOMASA, que fija como objetivo para el 2015 triplicar el uso de la biomasa en el Balance Energético Nacional, llevándolo del 3,5% actual al 10%, ejecutado con la asistencia de la FAO (Minoli, 2012). Este proyecto permitirá transformar en bioenergía los desechos forestales, la excreta animal y los residuos de las cosechas, además, se incluye la posibilidad de desarrollar plantaciones energéticas con especies de gran producción de biomasa. En términos ambientales el proyecto persigue evitar la emisión anual de 9,5 millones de toneladas equivalentes de dióxido de carbono, minimizar los efectos negativos de la disposición inadecuada de residuos con beneficios locales derivados de la reducción de la contaminación de cursos y cuerpos de agua, suelos y de la ocurrencia de incendios (Minoli, 2012).

1.2 *Bioenergía y cultivos energéticos*

En este apartado se definen conceptos relevantes en cuanto a la temática abordada, con el objetivo de mejorar la comprensión de los temas que se tratarán en los siguientes capítulos.

La bioenergía es la energía generada a partir de biocombustibles de origen biológico y renovable, como el bioetanol, el biodiesel y la biomasa, y propone darle un

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

aprovechamiento a los residuos de la agricultura y a las tierras poco productivas o irrigadas con aguas residuales tratadas, utilizándolas para la plantación de cultivos en alta densidad (IFPRI, 2006).

Este tipo de energía representa la oportunidad de generar un nuevo suministro energético al mundo, para satisfacer la enorme y creciente demanda de energía y ojalá para mitigar algunos de los efectos sobre el precio. Además, propone la idea de obtener energía de forma responsable con el ambiente, de una manera neutral en cuanto a emisiones de dióxido de carbono y también propone un modo en que los países en desarrollo puedan generar ingresos y trabajo a los ciudadanos de zonas rurales (ONU-Energía, 2007; Bustamente *et al.*, 2010).

En contraste con otras fuentes de energía renovable (tales como la hídrica, solar, o eólica), la bioenergía es capaz de ser convertida en cualquier servicio energético, como electricidad, calor (para cocinar y para secar), varias formas de energía mecánica y de producción a vapor, etc. Por otra parte, es independiente de las fluctuaciones de corto plazo en el suministro que ocurren típicamente con la energía solar o eólica, por ejemplo (ONU-Energía, 2007).

Producida localmente, la bioenergía, puede proporcionar energía para uso local, agrícola, industrial y en los hogares, en algunas ocasiones a menor costo que los combustibles fósiles. En algunos casos es verdaderamente sostenible, y en otros es altamente destructiva (ONU-Energía, 2007).

Uno de los mayores beneficios de usar la biomasa para energía es la posibilidad de reducir significativamente la Emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) asociados a los combustibles fósiles, ya que uno de los propulsores más importantes del desarrollo de este tipo de energía, en todo el mundo, es la preocupación acerca del cambio climático. Tomando en cuenta sólo las emisiones de dióxido de carbono durante las décadas recientes, la quema de combustibles fósiles (principalmente en los países industrializados) ha llegado al 75-85% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono, mientras que la deforestación y otros cambios en el uso de la tierra (sobre todo en los países tropicales en vías de desarrollo) representan el 15-25% (ONU-Energía, 2007). Las investigaciones actuales concluyen que la utilización de biomasa de manera combinada (cogeneración), esto sería la producción simultánea de calor útil y electricidad (Fenercom, 2010) a base de biomasa, es la mejor opción en comparación con la utilización de biomasa para combustibles de transportes u otros usos en cuanto a la reducción de emisiones en la próxima década, resultando también ser una de las más económicas.

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

Cuando los hogares tienen acceso a la bioenergía moderna, de mayor eficiencia en la conversión y calidad en los productos de combustión (o cualquier otra energía moderna con tal fin), la eliminación por etapas del tradicional uso de la energía de biomasa puede prevenir el agotamiento de los recursos naturales asociados a la quema de los bosques y otras actividades (ONU-Energía, 2007).

Las emisiones de gases de efecto invernadero en un ciclo de vida completo producidas por la bioenergía varían ampliamente según: los cambios en el uso de la tierra, la elección de la materia prima para la producción de biocombustibles, las prácticas agrícolas, los procesos de conversión o refinado, y las prácticas de uso final. Uno de los riesgos más grandes, sin embargo, es el impacto potencial en la tierra que se usa para la producción y cosecha de materias primas (en particular las tierras vírgenes y con alto valor de conservación) y sus efectos asociados en el hábitat, la biodiversidad y la calidad del agua, del aire y del suelo. Por otro lado, la producción de bioenergía puede representar la posibilidad de reducir la carga ambiental que se relaciona con la agricultura industrializada convencional, pudiendo aplicar prácticas agrícolas que maximicen la eficiencia energética, reduzcan insumos químicos (ONU-Energía, 2007) y aumenten la diversidad de especies para no caer en un monocultivo.

Teniendo en cuenta la apariencia física los biocombustibles pueden diferenciarse en sólidos, líquidos y gaseosos. Los sólidos están representados por pellets, astillas y briquetas, así como también la leña y el carbón vegetal. Los líquidos por el etanol o alcohol etílico, el metanol y el biodiesel. Los biocombustibles gaseosos están formados por diferentes mezclas en que el monóxido de carbono (CO), el metano (CH₄) y el hidrógeno (H₂) están presentes en forma preponderante (Baettig *et al.*, 2010).

Los distintos biocombustibles sólidos son generados por la transformación de biomasa lignocelulósica, representada principalmente por los residuos de cultivos agrícolas, de la industria maderera (aserrín, despuntes, etc.), de la cosecha forestal (ramas) y la biomasa proveniente de cultivos dedicados a estos fines, como son las plantaciones energéticas. De lo anterior se desprende otra clasificación que surge teniendo en cuenta la fuente de la que provienen los biocombustibles, pudiendo encontrar dentro de esta a los agrocombustibles que son combustibles derivados de la biomasa agrícola y como subproductos de las explotaciones agrícolas y de la agroindustria (Baettig *et al.*, 2010).

Otro tipo de biocombustible son los dendrocombustibles, estos derivan de la biomasa forestal, y se incluye dentro de esta clasificación todos los tipos de biocombustibles derivados directa o indirectamente de los árboles y arbustos que crecen en tierras

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

forestales y no forestales, así como también los subproductos industriales derivados de industrias forestales. Los subproductos de origen municipal pueden encontrarse dentro de esta clasificación de biocombustibles, representados por los sólidos recolectados de la basura de origen municipal y líquidos o gases derivados de la recolección y tratamiento de aguas servidas también de origen municipal (FAO, 2004).

Dentro de las fuentes de las que derivan estos combustibles, están los cultivos energéticos leñosos o cultivos en alta densidad, estos emplean especies de crecimiento rápido como álamos, sauces, eucaliptos, paulonias, acacias, ailantos, etc. En este tipo de cultivos los turnos de corta en general, son cortos (5-10 años) o muy cortos (<5 años) y la densidad de plantación es muy grande (Martín, 2007), encontrándose en la bibliografía rangos que van desde 1 500 a más de 100 000 individuos por hectárea (Baettig *et al.*, 2010; Martín, 2007). En este proyecto se trabajará con un clon de álamo, de probada adaptación a la zona y de rápido crecimiento.

De los cultivos energéticos se sabe, en cuanto al balance de energía de los mismos, que se requiere más energía para producir cultivos anuales que perennes, porque los primeros implican por lo general un mayor uso de maquinaria y de insumos químicos. En el caso de muchos cultivos energéticos perennes, la proporción energética (la cantidad de cultivo bioenergético útil producida por unidad de combustible fósil consumida) requerida para producir la materia prima es suficientemente alta como para que estos cultivos resulten atractivos (IFPRI, 2006).

Los cultivos energéticos pueden afectar las emisiones netas de CO₂ principalmente de dos maneras: proveen energía que puede sustituir la energía de los combustibles fósiles, y pueden cambiar la cantidad de carbono capturado en el sistema del cultivo. El beneficio neto de carbono depende de lo que hubiera ocurrido de no existir los mismos. Esto es, la cantidad y el tipo de combustibles fósiles que se hubiera consumido o el uso de la tierra que hubiera predominado si no se generara estos cultivos (IFPRI, 2006).

La cuantificación de biomasa aérea en cualquier componente de un ecosistema requiere un análisis destructivo directo o estimaciones indirectas del material vegetal para hacer las inferencias necesarias; el segundo caso es más práctico cuando se desea estimar la biomasa aérea de los árboles. Para ello, se debe contar con modelos que estimen la biomasa total considerando el tamaño y dimensiones de los árboles; es decir, modelos matemáticos (alométricos) basados en las relaciones alométricas que ocurren entre los órganos de un individuo (Alvarez, 2008).

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

La alometría estudia los patrones de crecimiento, es decir, la proporcionalidad entre razones específicas o relativas de crecimiento. Esta relación se conoce como ley de alométrica. Así, la hipótesis de alometría sugiere que existe proporcionalidad entre las tasas de crecimiento relativas de dos variables de tamaño que pueden ser el peso de diferentes secciones o parte de un organismo o una de sus dimensiones. Estos cambios en tamaño satisfacen una ecuación o función alométrica (Alvarez, 2008).

La mayoría de los trabajos reportados utilizan el método inicialmente propuesto por Kittredge (1944). Este se basa en la relación entre la biomasa de algún componente o del árbol completo con variables dendrométricas del mismo en una regresión lineal bajo las escalas logarítmicas. Sin embargo, también se utilizan otro tipo de funciones como las exponenciales (Alvarez, 2008), entre otras, donde no hay conversión de datos.

2. Fundamentación, Hipótesis y Objetivos

2.1 *Fundamentación*

La declinación de las reservas internacionales de combustibles fósiles, la demanda creciente de los mismo, la tendencia al alza de sus costos y la acción contaminante de los mismos sobre la atmósfera, además del aumento de gases de efecto invernadero, plantean en el corto plazo la necesidad de brindar alternativas al uso de los mismos (ya sea para calefacción, electricidad o combustibles líquidos), siendo deseable que estas provengan de fuentes que causen un mínimo impacto ambiental y sean sustentables en el tiempo.

Esta situación abre las puertas al estudio de nuevas fuentes de materia prima para la generación de energía y combustibles, entre las cuales la biomasa proveniente de forestales cultivados en altas densidades y cortos turnos de rotación, sin lugar a dudas ocupa un lugar preponderante.

Las Salicáceas, pueden constituir en Mendoza una alternativa válida para la producción de madera triturada y/o densificada para la posterior obtención de energía. Se debe tener en cuenta también que la Provincia posee actualmente gran disponibilidad de tierras no ocupadas.

Dichas forestaciones actúan como sumidero de CO₂, mitigando en parte los efectos producidos por el incremento de este gas de efecto invernadero en la atmósfera, pudiendo además proveer de materia prima a industrias de producción de biocombustibles sólidos y/o líquidos mediante el adecuado procesamiento de la biomasa obtenida.

Con respecto a lo mencionado anteriormente, es importante decir que en la actualidad no se cuenta con información que cuantifique la fijación de CO₂ por este tipo de cultivos en la región de Cuyo para los clones de álamo más difundidos. Por ello, es importante determinar cuánto de este gas es fijado por el sistema y cuanto del mismo permanece luego del turno de corta y combustión de la biomasa utilizable (brotes).

Estos datos son importantes de determinar por ser estos cultivos los que proveen el biocombustible sólido necesario para la bioenergía y porque esta es un tipo de energía alternativa que se encuentra en etapa de investigación en Argentina. Además, a partir de los resultados de este estudio, se puede obtener información que permita determinar las características y manejo de estos cultivos en un futuro.

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

Por otra parte, las funciones alométricas o modelos estimadores de biomasa tienen mucha aplicación en el campo forestal, porque presentan mucha flexibilidad en su uso; las variables más usadas son: el diámetro a la altura del pecho (DAP), diámetro a la altura del tocón (DAT), altura comercial (HC), altura total (HT) y combinaciones de ellas (Alvarez, 2008).

La aplicación de este tipo de modelos facilita la estimación de biomasa, utilizando para esto variables de fácil medición a campo que no implican la destrucción del material vegetal.

2.2 Hipótesis

Sobre la base de lo expresado anteriormente, se enuncian las siguientes hipótesis de trabajo:

- Los cultivos energéticos de álamo `Conti 12`, contribuyen a la disminución del CO₂ del ambiente, fijando el mismo en la biomasa y generando, a largo plazo, un sumidero de carbono en el suelo que lo sustenta, a través de la descomposición de la biomasa remanente (tocón y raíz).
- Los cultivos energéticos de álamo `Conti 12`, manifiestan un balance positivo entre el CO₂ fijado por el sistema y el liberado a la atmósfera por combustión de la biomasa utilizable (brotes).
- La función estimadora de biomasa permite determinar el peso fresco de los brotes de forma confiable para ese sitio.

Corresponde en consecuencia realizar investigaciones específicas que determinen por una parte la producción de biomasa y comportamiento en el tiempo de estos cultivos, y simultáneamente cuantificar la fijación de dióxido de carbono por los forestales, para poder realizar el balance entre este proceso y el de emisión de este gas cuando se produzca la combustión de la biomasa aérea obtenida.

2.3 Objetivos

Como **objetivo general** se plantea cuantificar el carbono almacenado en la biomasa utilizable y remanente, como también aquél presente en el suelo de un cultivo energético de álamo `Conti 12`. Además, realizar el balance entre el CO₂ fijado por el sistema y aquél liberado por la combustión de la biomasa utilizable (brotes). Por otra parte, se propone desarrollar una función alométrica o estimadora de biomasa que cuantifique la biomasa aérea (peso fresco) del cultivo.

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

Como **objetivos específicos** se plantean:

- Cuantificar la biomasa utilizable (brotes) y la biomasa remanente (raíces y tocón) de la planta.
- Cuantificar el carbono presente en cada fracción de la planta (brotes, tocón y raíz).
- Cuantificar el carbono presente en el suelo del cultivo energético y el existente en una parcela adyacente no cultivada.
- Cuantificar el CO₂ desprendido a la atmósfera por la combustión completa de la biomasa utilizable.
- Determinar el balance entre el CO₂ fijado en el sistema y el emitido a la atmósfera por la combustión de la biomasa utilizable producida.
- Elaborar una función alométrica, para el sitio donde está establecido el cultivo (distrito de Perdriel), que estime el peso fresco de los brotes utilizando el diámetro de la base de los mismos como la variable independiente del modelo.

3. Antecedentes

Las pasturas perennes y la silvicultura de corta rotación podrían producir un aumento del contenido de carbono de los suelos, en comparación con los cultivos agrícolas anuales. Sin embargo, las probabilidades de secuestro de carbono en áreas extensas podrían verse reducidas si la mayor parte de esta materia orgánica fuese convertida en bioenergía, produciéndose un derrame de carbono en la atmósfera (ONU-Energía, 2007).

Generalmente deberían evitarse los cultivos que requieren de grandes insumos de energía fósil (como los fertilizantes convencionales) y de buena tierra (agrícola), y que rinden relativamente poca energía por hectárea. Sin embargo, incluso la siembra y la cosecha de cultivos energéticos sostenibles pueden tener impactos negativos si remplazan a los bosques primarios, porque pueden liberarse grandes cantidades de carbono del suelo y biomasa de los bosques, lo que negaría cualquier beneficio que los biocombustibles pudieran entregar durante décadas (ONU-Energía, 2007).

Por lo general, en el primer año de establecimiento de un cultivo energético, la planta experimenta un crecimiento limitado debido a la poca extensión de su sistema radicular y de su superficie fotosintética, situación que mejora considerablemente en el segundo año hasta que se completa el ciclo definido para la corta. Por otra parte, entre ciclos sucesivos de corta se produce una mayor tasa de generación de biomasa debido al número de rebrotes desde la cepa. El rebrote presenta un crecimiento aún más alto que la plantación inicial, debido a que las cepas ya tienen un sistema radicular desarrollado y se consigue un control más eficaz de la competencia herbácea. La mantención del vigor de las cepas, a través de sucesivos rebrotes, depende de factores como el genotipo, su interacción con el sitio y con las prácticas silviculturales aplicadas (Baettig *et al.*, 2010).

El género *Populus* presenta alrededor de una treintena de especies adaptadas a una gran diversidad de condiciones edafoclimáticas, lo que revela una amplia plasticidad genética (Baettig *et al.*, 2010), esta es una de las razones por la cual se eligió este género para el cultivo energético de este trabajo.

La superficie mundial de plantaciones de álamos alcanza los 6,7 millones de hectáreas, de las cuales 3,8 millones (56%) se destinan principalmente a la producción de madera y 2,9 millones (44%) para fines medioambientales (Calderón, s/f).

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

En Argentina se cree que hay una superficie total cultivada con álamos de 63 500 has. las cuales se encuentran distribuidas principalmente en la zona del Delta del Paraná, zonas de campo de Buenos Aires y en los oasis bajo riego de Mendoza, Valle del Río Negro y San Juan. Los principales usos de la madera de álamo en nuestro país son: madera para pulpa y papel, madera para tableros aglomerados, madera aserrada, madera contrachapada, fósforos, embalajes y muebles (Calderón, s/f).

En Mendoza se estima la existencia de unas 14 a 15 mil hectáreas forestadas con álamos, una proporción importante 40 al 50% corresponden a cortinas rompe vientos que cumplen la función de protección de los cultivos aledaños y generan paralelamente un ingreso adicional por la venta de madera; y el resto corresponde a plantaciones en macizo o bosques que tienen como destino principal la obtención de madera para aserrado o triturado (Calderón, s/f).

Las plantaciones forestales de álamo son las de mayor importancia en Mendoza, ocupan más del 90% de los bosques cultivados, y luego se encuentran las de eucalipto que representan alrededor del 5%. Por lo general para el aprovechamiento forestal de álamo los turnos de corta se cumplen de 10 a 15 años, en función de la zona y la densidad y de 8 a 12 años para sauce. Este depende del objetivo de producción y el mercado. Además del turno de corta se deben definir los turnos técnicos, económicos y/o financieros (Dirección de Producción Forestal, 2012).

En su uso rural las plantaciones de álamos se destinan a construcciones rurales, postes y embalajes. En cuanto a los usos medioambientales se utilizan para reutilización de aguas residuales tratadas, fitorremediación, estabilización de riberas y dunas, retención de carbono, usos energéticos, sistemas agroforestales y otros como ornamental y forrajera (Dirección de Producción Forestal, 2012).

El clon `Conti 12´ se adapta de buena manera en la región de Cuyo, esto puede verse en los incrementos medios anuales de madera del mismo. Así lo corroboran los datos obtenidos en el departamento de San Carlos por Bustamante *et al.* (2005) como aquellos encontrados en la localidad de Barreal (San Juan) por Bustamante y Pérez (2006). Las características que más influyen sobre el rendimiento en biomasa, según Baettig *et al.* (2010), son el crecimiento en altura, el diámetro basal y el número de brotes.

Este clon, en comparación con otros, presenta baja susceptibilidad a la “Cancrosis” (*Septoria musiva*), enfermedad que ataca a álamos en el Valle de Uco y otras áreas de la provincia, pero se ve afectado por la plaga del “taladrillo” (*Metaplatypus mutatus*)

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12´, Perdriel, Mendoza.”

siendo este un problema de relevancia debido a que perjudica árboles de diámetros mayores y de buen desarrollo (Calderón, s/f).

El clon `Conti 12´ se adapta a suelos con problemas de drenaje (Achinelli, 2006) y presenta tolerancia a valores de salinidad no superiores a los 4 dS.m⁻¹ ó 4.000 µS.cm⁻¹, pudiendo ser plantado con valores algo superiores, aunque los rendimientos disminuyen proporcionalmente con el aumento de la misma (Calderón, s/f).

La capacidad de fijación de carbono por los ecosistemas forestales varía en función de la composición florística, la edad y la densidad de la población. En muchos estudios se ha empleado la biomasa de los árboles para estimar su contenido de carbono, a través de la multiplicación de la cantidad disponible en una determinada superficie por un factor que va desde 0,40 hasta 0,55; ya que varios autores han encontrado que es la proporción de carbono contenido en cualquier especie vegetal (Díaz Franco *et al.*, 2007). Según Chidiak *et al.* (2003) los factores que influyen en el contenido potencial de carbono en el bosque implantado son: la densidad de plantación, la tasa de supervivencia y la tasa de crecimiento de los árboles.

En general, se acepta que el contenido de carbono corresponde al 50% de la biomasa. El IPCC (1996) señala que el rango más citado para el contenido de carbono en la biomasa es de 43 a 58%. Sin embargo, diferentes estudios denotan la variabilidad del contenido de carbono según especie y tejido del árbol. Cubero y Rojas (1999), según cita Alvarez (2008), señalan que el contenido de carbono en la biomasa arbórea se ve influenciado por la calidad del sitio y edad de las plantaciones.

En el estudio realizado por Deraedt and Ceulemans (1998) donde se cuantifica el valor de carbono presente en la biomasa de *Populus sp.*, se observa que se encuentra representado en un 46,8% en brotes de álamos, con un remanente de 4,4% de carbono en las cenizas; este porcentaje se debe al método y temperatura usados para la combustión de la biomasa forestal. Gasol *et al.* (2009) cuantifica el porcentaje de carbono presente en la biomasa seca de *Populus sp.*, siendo este de 50,3%, en un cultivo cuya densidad de plantación es de 10 000 plantas.ha⁻¹ y un turno de corta de 5 años.

Según De la Cruz Calleja (2005) el porcentaje de carbono presente en la madera de los fustes de *Populus sp.* es de 49%, mientras que en las ramas y en la biomasa muerta el valor es menor (48%). En ese trabajo el autor expresa la producción total media aérea de un cultivo de *Populus x canadensis* clon `I-214´ de 14 años de edad y

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12´, Perdriel, Mendoza.”

una densidad de cultivo de 400 árboles.ha⁻¹ y en base a los datos obtenidos del porcentaje de carbono cuantifica las toneladas de carbono fijado por el mismo.

Por otra parte, es importante conocer los datos de la composición química de la madera porque los compuestos químicos son importantes para determinar el comportamiento energético de la biomasa, ya que influyen en el poder calorífico, en la composición química de las cenizas y en la composición química de los gases producidos en la combustión. En cuanto a la composición química de las cenizas de álamo, estas pueden ser empleadas como abono por su contenido de K₂O, CaO y P₂O₅. Cuanto mayor sea el contenido en estos tres compuestos, mejores serán las cenizas como abono (Martín, 2007). La madera de *Populus sp.* presenta alrededor de 0,2% de su peso en nitrógeno, mientras que la corteza alrededor de un 1%; lo cual se traduce en una mayor emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x) en la combustión de biomasa incluyendo corteza (Baettig *et al.*, 2010).

La siguiente tabla muestra el contenido de carbono (g%g) presente en las distintas fracciones de una planta, en un cultivo energético de sauce de 19 años de edad.

Tabla N° 1: Carbono presente en las distintas partes de una planta, perteneciente a un cultivo de sauce para obtención de biomasa.

Planta	C (g%g)
Fuste	49,1
Follaje	46,4
Tocón parte aérea	49,0
Tocón parte subterránea	48,0
Raíces gruesas	46,4
Raíces finas	46,5

Fuente: Pacaldo *et al.*, 2012. "Greenhouse Gas Potentials of Shrub Willow Biomass Crops Based on Below- and Aboveground Biomass Inventory Along a 19-Year Chronosequence", USA.

En cuanto a producción de biomasa, Baettig *et al* (2010) expresa en su trabajo los resultados hallados por Nardin (2007) sobre el rendimiento de biomasa aérea de distintos clones de *Populus* en ensayos realizados en Italia, con una densidad de plantación de alrededor de 7 500 pl.ha⁻¹ y de corta bienal. Los clones utilizados son 'Monviso', 'I-214' y 'Lux', entre otros, con una producción de 35 t ms.ha⁻¹; 20 t ms.ha⁻¹ y 17 t ms.ha⁻¹ respectivamente.

"Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon 'Conti 12', Perdriel, Mendoza."

Laureysens *et al.* (2005) cuantifica la producción de biomasa aérea de distintos clones de álamo en un cultivo de alta densidad (10 000 pl.ha⁻¹) y con un turno de corta de dos años, en Bélgica, con la finalidad de comparar el rendimiento de biomasa entre estos. Los principales clones que se mencionan en el estudio son: `IBW2` (*P. deltoides* x *P. trichocarpa*), `Woltersen` (*P. nigra* (N)), `Fritzi Pauley` y `Trichobel` (clones de *P. trichocarpa* (T)) con una producción de 3,2 y 19,4 t ms.ha⁻¹ para `IBW2` y `Woltersen` respectivamente y un valor promedio de 16,4 t ms.ha⁻¹ para `Fritzi Pauley` y `Trichobel`.

En la Provincia de Mendoza, los forestales que se han destinado a cultivos energéticos bajo el proyecto denominado “Cultivo de forestales para producción de biomasa: efecto del sitio, densidad de plantación y turno de corta” del año 2009 al 2011, comprende especies de rápido crecimiento como dos clones de sauces, dos clones de álamos y una especie de eucalipto, esto se debe a que la captura de carbono está directamente relacionada con el crecimiento de la biomasa, a mayor crecimiento de ésta la captura será mayor (Díaz Balteiro, 2002), entre otras características deseables, estas especies también presentan un elevado poder calórico y bajo porcentaje de cenizas (Bustamante *et al.*, 2010).

Los datos obtenidos por Bustamante *et al.* (2009), en las parcelas de investigación ubicadas en el distrito del Pastal (Las Heras) con una densidad de plantación de álamo `Conti 12` de 10 000 y 20 000 pl.ha⁻¹, hacen referencia a la cantidad mínima, promedio y máxima de brotes por planta, a la altura promedio de los mismos, peso fresco y seco promedio por planta de los brotes (kg.pl⁻¹) y a la producción por parcela (kg.parcela⁻¹), siendo los valores de peso fresco 105,2 kg.parcela⁻¹ y 92,7 kg.parcela⁻¹ para las densidades de 10 000 y 20 000 pl.ha⁻¹ respectivamente y los de peso seco de 2,7 y 2,5 kg.planta⁻¹. Se expresa también en ese estudio el poder calórico superior de la madera del clon, registrando un valor de 4 265 cal.g⁻¹ y un porcentaje de ceniza y materia volátil de 0,59% (peso/peso) y 92,5% (peso/peso) respectivamente, mientras que la corteza presenta valores de 4 562 cal.g⁻¹ de poder calórico superior, un 4,5% (peso/peso) de cenizas y un 85,98% (peso/peso) de materia volátil. Según Martín (2007) los valores medios de poder calórico para este clon están comprendidos entre los 4 449 y 4 601 kcal.kg⁻¹.

Dentro del marco del proyecto mencionado se determinó una función estimadora de biomasa para cada clon implantado en ese sitio. La relación que presentan las variables de diámetro de base (mm) y peso fresco de los brotes (kg) es de tipo curvilíneal. Para el clon `Conti 12` el modelo ajustado, según Bustamante *et*

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

al. (2009), con previa transformación logarítmica de las variables y mediante un análisis de regresión simple lineal, es una función potencial.

Según la bibliografía consultada, se han empleado con éxito tres tipos de modelos: i) $Y = aX^2$; ii) $Y = aX^2h$ y iii) $Y = aX^b$, donde “Y” es el valor de biomasa vegetal en peso seco, “X” es el diámetro del tronco a la altura del pecho, “h” la altura de la planta y “a” y “b” los coeficientes a ser estimados. La utilidad de estas ecuaciones se considera teniendo en cuenta su buen valor predictivo para todas las fracciones de la biomasa, resultando ser muy utilizada la (ii) para estimar la biomasa de ramas y las restantes para la madera (tronco). De ellas la función de alometría (iii) es comúnmente empleada para expresar la proporción entre el incremento relativo de la biomasa y el diámetro de los árboles, lo que puede variar en diferentes ambientes (Castro *et al.*, 1996).

Alvarez (2008) expresa en términos porcentuales que el fuste del árbol concentra la mayor cantidad de biomasa aérea, luego están las ramas y por último las hojas y la corteza del fuste, concluye además que el diámetro a la altura del pecho (DAP) es la variable independiente más correlacionada con la biomasa aérea.

Laclau (2003) llega a la conclusión de que el compartimento más relevante en cuanto a contenido de carbono a nivel de planta es el fuste. Según datos reflejados en el estudio de Chidiak *et al.* (2003), también manifiesta que la biomasa aérea (fuste y copa) de plantaciones de pino ponderosa, con un turno de corta de 18-20 años, concentra el 84% de la biomasa y del carbono total (el resto corresponde a biomasa subterránea en raíces).

En un estudio realizado en México, Méndez-González *et al.* (2011) obtiene mediante funciones alométricas, valores de biomasa aérea, carbono y dióxido de carbono equivalente en una plantación de *Pinus devoniana* Lindl. y *Pinus pseudostrobus* Lindl. después de 12 años de establecida la plantación.

La Tabla N° 2 resume los resultados de un estudio realizado en la Reserva de la Biosfera El Cielo, México (Rodríguez Laguna *et al.*, 2009), en este se analizó la captura de carbono por un bosque de pino-encino de una superficie de 13 272,65 hectáreas.

Tabla N° 2: Distribución del carbono presente en los depósitos del bosque de pino-encino dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas.

Depósito	C/ha (t)	Porcentaje (%)	C total (t)
Fustes, ramas y hojas	82,9	75,3	1 100 435,4
Renuevos	0,4	0,4	5 309,1
Hojarasca	9,9	9,0	131 133,8
Necromasa	0,3	0,3	4 114,5
Raíces	16,5	15,0	219 131,5
Total	110,0	100,0	1 460 124,3

Fuente: Rodríguez Laguna *et al.*, 2009. Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable, México.

Díaz Balteiro (2002) encuentra, en un cultivo de *Populus sp.* con un turno de corta de 14 años y una densidad de 278 pl.ha⁻¹, el valor de carbono bruto capturado en la madera, sin tener en cuenta aquél que se libera a la atmósfera luego.

Arias-Giraldo *et al.* (2007) determina, para un sistema silvopastoril en Colombia, el CO₂ fijado por la biomasa aérea de la especie *Leucaena leucocephala* cultivada en alta densidad (10 000 pl.ha⁻¹) y también aquél presente en el suelo del cultivo.

En los cultivos dendroenergéticos el carbono acumulado en las temporadas de crecimiento (en la biomasa aérea) es re-emitido como CO₂ atmosférico en tan sólo unas semanas o meses luego de la cosecha, mediante los procesos de combustión directa o de conversión y combustión de biocombustibles líquidos. Descartando las emisiones propias de CO₂ de las labores silviculturales, como uso de agroquímicos, preparación del terreno, etc., existe un balance neutro (Baettig *et al.*, 2010) si sólo se tiene en cuenta la fijación y emisión de CO₂ por parte de la biomasa aérea (brotes).

En cuanto a la biomasa subterránea, los distintos clones de álamo parecen diferir en número y tamaño de las raíces, como también en la profundidad y orientación del crecimiento de las mismas (Al Afas *et al.*, 2008), la biomasa radicular representa entre un 10 y un 40% la biomasa total de la planta (Chidiak *et al.*, 2003).

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon ‘Conti 12’, Perdriel, Mendoza.”

Las raíces son una fracción metabólicamente activa grande dentro de lo que es la biomasa total del árbol. Las raíces finas representan solo una pequeña fracción del total de la biomasa, pero la producción y volumen de estas son significativas en cuanto al contenido de carbono que presentan. La concentración de carbono en este tipo de raíces difiere significativamente entre distintos clones de álamo, por ejemplo entre los clones Primo y Balsam Spire en un estudio realizado por Al Afas *et al.* (2008). El autor además concluye que no se encontraron diferencias significativas en el contenido de carbono de las raíces finas a distintas profundidades de suelo.

Se sabe que las tasas de crecimiento de longitud de la raíces se correlacionan de buena forma con el crecimiento de la parte aérea de las plantas, por lo menos en árboles jóvenes. Sin embargo en árboles maduros esta relación puede desaparecer y el crecimiento por debajo y encima del suelo de la planta volverse independiente. Otro aspecto importante es que la fijación de carbono en las raíces parece depender fuertemente del genotipo de la planta (Al Afas *et al.*, 2008).

En los cultivos energéticos el sistema radicular es un aspecto importante para el rebrote y la producción del cultivo después de cada ciclo de corta. Es evidente que las raíces gruesas cumplen un rol dominante en cuanto al rebrote de las plantas. Para maximizar el crecimiento y producción del cultivo es importante el suministro de nutrientes y agua que reciben las plantas, este suministro depende de la exploración de las raíces finas en el suelo. Por otra parte, el contenido de carbono de este tipo de raíces es importante para el balance de carbono de los cultivos energéticos (Al Afas *et al.*, 2008).

De la Cruz Calleja (2005) encuentra el valor de biomasa subterránea para un cultivo de *Populus x canadensis* clon 'I-214' con una densidad de 400 pl.ha⁻¹ y de 14 años de edad suponiendo que la misma es el 15% de la biomasa total de la planta; expresando también las toneladas de materia seca que corresponden a las raíces y el tocón y aquellas de carbono presente en las fracciones mencionadas.

Un estudio realizado en Estados Unidos revela, para un cultivo energético de sauce de 19 años de edad, el contenido de CO₂ presente en la biomasa del tocón (tanto en la parte aérea como subterránea) sumado el de las raíces gruesas y otro valor obtenido si se añade a lo anterior el CO₂ fijado por las raíces finas. Expresa también que el porcentaje de biomasa de raíces gruesas constituye el 69% del total de biomasa subterránea, sugiriendo que la biomasa de las raíces en un cultivos energético tiene una gran importancia en cuanto al secuestro de carbono a largo plazo (Pacaldo *et al.*, 2012).

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon 'Conti 12', Perdriel, Mendoza.”

El carbono orgánico del suelo afecta la mayoría de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo vinculadas con su calidad, sustentabilidad y capacidad productiva. Dependiendo de su uso, el suelo actúa ya sea como fuente o como fijador de carbono (Baettig *et al.*, 2010). Por ejemplo, suelos que estuvieron utilizados para producciones no forestales, pueden seguir perdiendo carbono hasta que los árboles plantados durante la reforestación maduren (Chidiak *et al.*, 2003).

Chidiak *et al.* (2003) cita los resultados hallados por Laclau (2003) en base a muestras obtenidas en Patagonia de cultivos de pino ponderosa y ciprés, en el cual manifiesta que la contribución porcentual del suelo y el mantillo al carbono almacenado en el sistema fluctúa entre un 60 y un 70% del total. Por otro lado, y teniendo presente que las variables del sitio (suelo, clima, etc.) influyen en el carbono total que almacena la plantación, deduce que si bien el contenido de carbono en el suelo varía entre plantaciones de pino ponderosa y ciprés de la cordillera la importancia porcentual de los subsistemas suelo y hojarasca se mantiene dentro del rango antes mencionado para ambos tipos de bosque. De la Cruz Calleja (2005) también analiza el carbono total en suelo, aunque a diferencia de Laclau (2003) lo hace en un cultivo de álamo y expresa en función de los datos encontrados el carbono presente a 80 y 20 cm de profundidad del suelo.

Una vez que se lleva a cabo la cosecha del cultivo, el carbono que se encuentra fijado en el árbol comienza a ser liberado de nuevo a la atmósfera como CO₂. Esta liberación se produce con bastante rapidez si la madera se utiliza como combustible o se utiliza con fines a corto plazo, como por ejemplo el caso de la madera destinada a la producción de papel. Las tasas de liberación de carbono resultantes de estos usos, pueden variar considerablemente (Bateman y Lovett, 2000).

En los cultivos energéticos solo una parte de la biomasa total es cosechada, permaneciendo en el sitio la biomasa correspondiente a las raíces y tocón. El carbono que forma parte de esta biomasa se descompone lentamente y se vuelve parte de la materia orgánica del suelo (Vande Walle *et al.*, 2007), permaneciendo en el sistema como un sumidero de carbono.

Las características de los cultivos y los datos obtenidos de producción de biomasa, fijación de carbono y CO₂ de otros estudios resultan importantes para la posterior comparación con los resultados aquí encontrados. Para ello, se describe a continuación las características del sitio y el uso de los recursos del área dónde se encuentra el cultivo energético de `Conti 12` analizado en este trabajo.

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

4. Caracterización del área de estudio y ubicación geográfica

4.1 Ubicación geográfica

El sitio del ensayo se encuentra ubicado en el distrito de Perdriel, departamento de Luján de Cuyo y se encuentra incluido dentro del Proyecto “Cultivo energético con forestales: efectos del ciclo de corta; fijación y balance de carbono”. Este departamento se sitúa a los 32°56’ latitud Sur y 68°49’ longitud Oeste en la zona noroeste de la Provincia de Mendoza, a 18 km de la Capital. Su superficie es de 4 847 km², con una población de 119 888 habitantes aproximadamente (INDEC, 2010), ocupando la Cordillera de los Andes una gran parte del departamento. Las parcelas de estudio se localizan a los 33° 05’ 32,4’’ latitud Sur y 68° 57’ 40,6’’ longitud Oeste, a una altura de 1 044 metros sobre el nivel del mar.

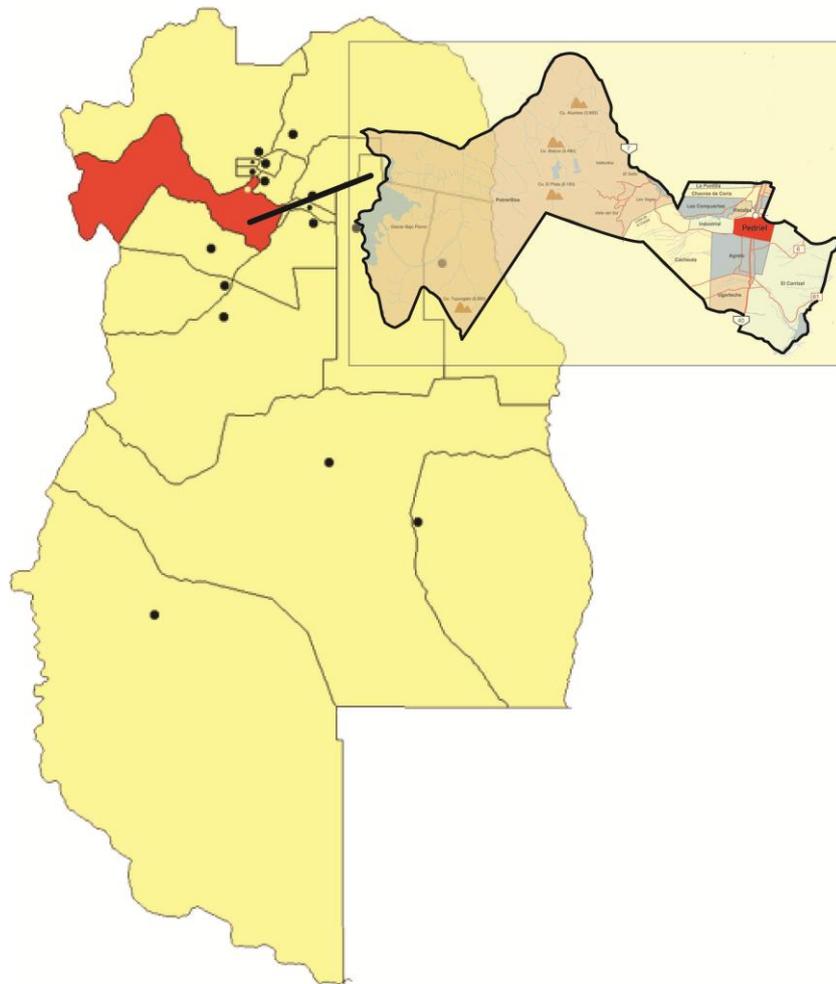


Figura N° 2: Mapa de la Provincia de Mendoza, del departamento Luján de Cuyo y el distrito de Perdriel. Fuente: Municipalidad de Luján de Cuyo. <http://www.lujandecuyo.gov.ar/>

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon ‘Conti 12’, Perdriel, Mendoza.”

4.2 Clima

En gran parte la provincia de Mendoza impera el clima árido o semiárido, con registros de precipitación media anual de 200 mm. Desde el punto de vista de las precipitaciones, Mendoza se encuentra dentro del régimen subtropical continental, con escasas lluvias durante todo el año, observándose, la máxima en verano con registros para el mes de enero superiores a los 30 mm y la mínima corresponde a los meses de julio y agosto, con registros inferiores a 10 mm (Capitanelli, 1967). Las precipitaciones son altamente variables en el tiempo debido a la acción del anticiclón subtropical semipermanente del Atlántico (Capitanelli, 1967); y en el espacio esta variación puede ir de 100 mm.año⁻¹ en el norte de la provincia a 450 mm.año⁻¹ en el sur, y hacia el oeste, en las montañas, registros de hasta 600 mm.año⁻¹ (Torres *et al.*, 2003).

La temperatura media en la llanura mendocina es mayor de 15°C, con temperaturas extremas de 42°C y -10°C y el promedio anual de la humedad relativa ambiente es del 40 al 50% (Moscatelli, 1990).

Los vientos más frecuentes provienen del sudeste, con velocidad media anual de 5 km.h⁻¹, siendo los más intensos los de primavera y verano, estos son los responsables de casi la totalidad del agua que precipita en la planicie mendocina y en la falda oriental de la montaña (Capitanelli, 1967). La provincia está sometida también al efecto de los vientos tipo fohen (zonda), estos se caracterizan por ser cálidos, secos y propios de las estaciones primavera y otoño (Moscatelli, 1990).

Con respecto a las contingencias climáticas que pueden ocasionar daños a los cultivos, dentro de la provincia, en la zona occidental del oasis norte, se distinguen las heladas y el granizo. Las probabilidades de heladas se producen en un período entre marzo y septiembre, siendo las más peligrosas aquellas que se producen de forma temprano y tardía, y las de las granizadas entre septiembre y abril, coincidiendo con el período de máxima actividad vegetativa (Capitanelli, 1967). El distrito de Perdriel, Luján de Cuyo, suele sufrir heladas vinculadas a la topografía, donde por este motivo se ve dificultado el libre drenaje del aire frío (Therburg *et al.*, 2004).

Entre las condiciones climáticas que favorecen a Mendoza, es necesario destacar sus valores térmicos, la intensidad de la luz solar, su reducida nubosidad, sus vientos moderados y de escasa fuerza en gran parte del año, y el bajo porcentaje de humedad relativa de la atmósfera (Capitanelli, 1967).

Las Tablas N° 3 y 4 presentan, para la zona donde se ubica el sitio del ensayo, los valores medios anuales de temperatura y precipitaciones de la estación meteorológica de Perdriel (ubicada a 33° 7' 7,39" latitud Sur y 68° 54' 32,79" longitud Oeste). Los datos expresados por la Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas (2012), reflejan para este distrito sólo aquellos obtenidos en el período que va desde el año 2007 al año 2011.

Tabla N° 3: Temperaturas medias anuales, Estación Meteorológica de Perdriel, Mendoza.

Año	Temperatura Máxima(°C)	Temperatura Media(°C)	Temperatura Mínima(°C)
2007	27,7	12,9	0,2
2008	29,2	14,2	0,8
2009	30,0	14,3	0,8
2010	29,7	14,0	-0,1
2011	29,3	13,8	-1,7
Promedio	29,2	13,8	0

Fuente: Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas, 2012.

Según los datos de temperatura consultados, se registra en ese lapso de tiempo una máxima absoluta de 39°C (Noviembre del 2010) y una mínima absoluta de -10,7°C (Junio del 2011).

Tabla N° 4: Precipitación total anual, Estación Meteorológica de Perdriel, Mendoza.

Año	Precipitación total anual (mm)
2007	226,8
2008	299,8
2009	304,6
2010	193,8
2011	289,8
Promedio	262,9

Fuente: Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas, 2012.

Como se observa en la Tabla N° 4 el promedio de precipitación total anual para ese rango de años (2007-2011) en el sitio de Perdriel es de 262,9 mm.

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

4.3 Agua

Los cursos de agua en la provincia de Mendoza tienen régimen nival, vale decir que presentan mayores caudales en verano, en concordancia con el aumento de las temperaturas y por lo tanto con la fusión de la nieve y de los glaciares, y menores caudales en invierno (Torres *et al.*, 2003).

La agricultura mendocina no se sostiene con las lluvias, además estas no originan cursos permanentes capaces de mantener el riego pues el balance hídrico es francamente deficitario (Capitanelli, 1972).

El oasis irrigado que tiene el mayor déficit hídrico es el del norte de la provincia, oasis alimentado por el río Mendoza, en donde los caudales superficiales son complementados con volúmenes muy importantes de agua subterránea. La extracción anual de agua subterránea en este oasis es de aproximadamente 350 hm³ y se realiza principalmente en los períodos de primavera y verano (Torres *et al.*, 2003).

En el embalse subterráneo Norte, las zonas de acuíferos semiconfinados y confinados, presentan tres niveles principales de extracción de agua subterránea, en correspondencia con tres niveles del subsuelo donde se ubican los paquetes sedimentarios más permeables. La profundidad de estos tres niveles cambia dentro de la cuenca en correspondencia con los cambios debidos a los procesos que los han generado (Torres *et al.*, 2003).

Los niveles identificados en general se ubican, el primero entre 60 y 120 m de profundidad, el segundo entre 150 y 200 m de profundidad y el tercero entre 240 y 350 m. Existe un permanente cambio de pozos que explotan los niveles primero y segundo por otros que pasan a explotar el tercer nivel, ya que existe una continua salinización de los primeros niveles por fallas en los pozos debidas a roturas de las cañerías de aislación o deficientes cementaciones entre acuíferos de muy distintas calidades de agua (Torres *et al.*, 2003).

El cultivo energético en estudio es regado con agua de pozo. La siguiente tabla muestra el resultado del análisis de una muestra de agua que se tomó del mismo en el año 2009.

Tabla N° 5: Análisis diagnóstico de salinidad y sodicidad del agua de riego del cultivo, distrito de Perdriel, Mendoza.

Muestra/Determinación	Muestra 1
pH	7,2
Conductividad eléctrica (dS/m)	1,6
Calcio (me/L)	10,4
Magnesio (me/L)	2,4
Sodio (me/L)	4,2
RAS	1,7
Cloruro (me/L)	7,0
Sulfatos (me/L)	7,6
Bicarbonatos (me/L)	2,0
Carbonatos (me/L)	-

El valor de pH que se observa en el análisis de agua presenta un valor muy cercano al neutro.

Se puede decir que el agua, con respecto a la salinidad que presenta, se encuentra dentro de la categoría C3 de la clasificación de RIVERSIDE (U.S). El rango de esta categoría va desde 750 a 2 250 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. El agua de riego que se encuentra dentro de esta categoría debe ser usada en suelos de moderada a buena permeabilidad y deben elegirse cultivos de moderada a buena tolerancia a la salinidad (Jarsun, 2008; Martí et al., 2003).

Para estimar el peligro de sodificación del suelo, teniendo en cuenta el contenido de Carbonatos y Bicarbonatos del agua en relación con el sodio, se utiliza el parámetro llamado Carbonato de Sodio Residual (C.S.R.). Según la clasificación del laboratorio de Salinidad de RIVERSIDE, corresponde en este caso, por ser el valor obtenido menor a 1,25 me/L de C.S.R., a agua de buena aptitud para riego (Jarsun, 2008), hecho que también se corrobora con el valor de RAS observado (Martí et al., 2003).

4.4 Suelo

En la provincia de Mendoza se han reconocido 3 Órdenes, 7 Subórdenes, 11 Grandes grupos y 16 Subgrupos (Moscatelli,1990). Para la clasificación taxonómica se siguieron los criterios del sistema Soil Taxonomy (1975), como se muestra en la Figura N° 3.

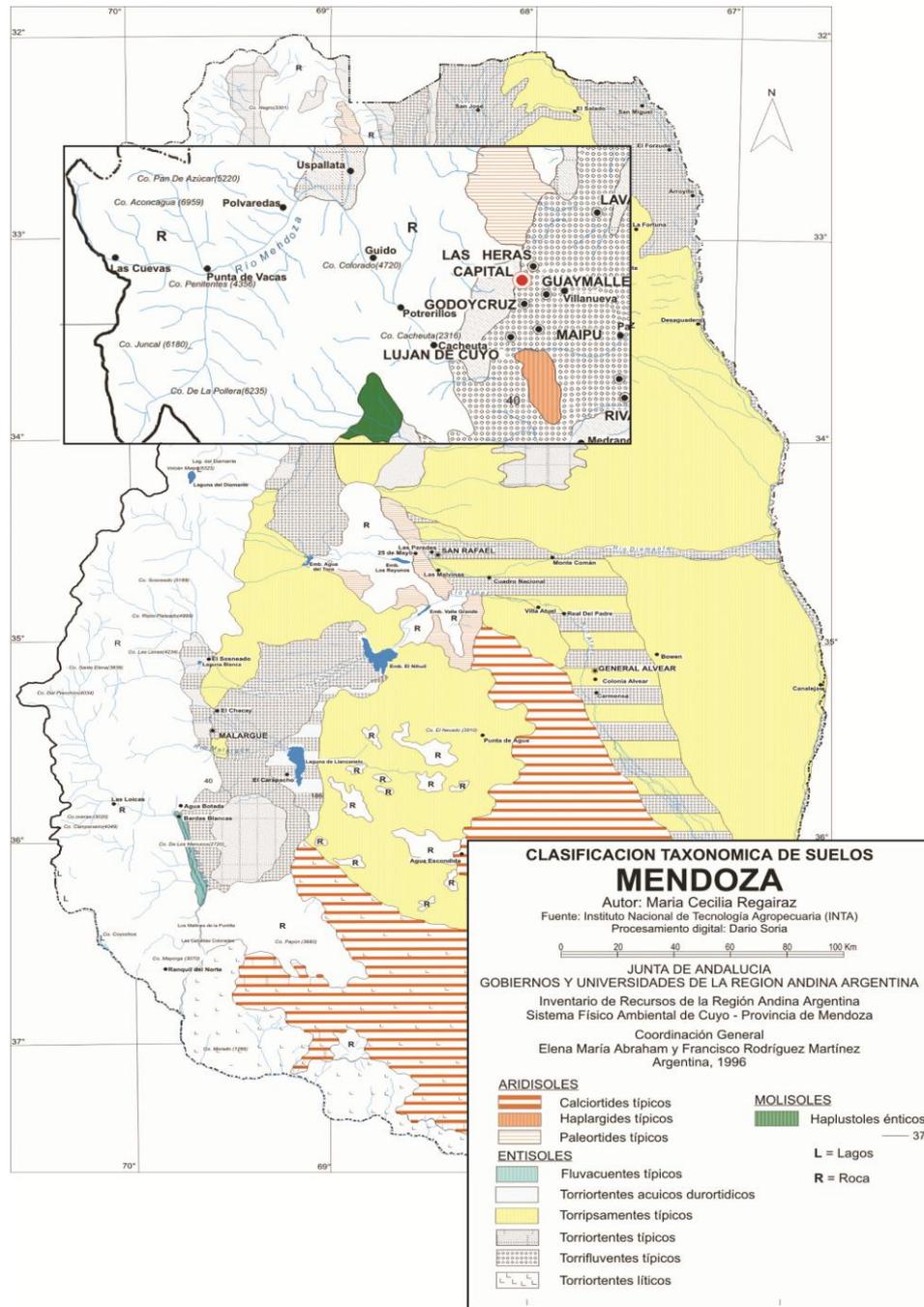


Figura Nº 3: Clasificación taxonómica de suelos de Mendoza. Fuente: Regairaz M., Centro Científico Tecnológico (CCT), CONICET Mendoza.

<http://www.cricyt.edu.ar/ladyot/catalogo/cdandes/cap06.htm#inhalt>

A partir de la figura anterior, que representa la clasificación taxonómica de suelos en Mendoza, se puede decir que el orden que predomina en el departamento de Luján de Cuyo es el Entisol. Son suelos minerales formados sobre materiales muy recientes que no tienen un perfil diferenciado, pudiendo tener un horizonte superficial diagnóstico como un epipedón ochrico, pobre en materia orgánica y de color claro, o un Antrópico, que ha adquirido características semejantes a la de un mólico por intervención del hombre (Regairaz, 2000). Son suelos profundos de nulo desarrollo “Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdiel, Mendoza.”

genético. Pueden tener un débil horizonte A, al que subyace una sucesión de horizontes C con diversas concentraciones salinas (Panigatti, 2010).

El bajo contenido de materia orgánica en los suelos se debe a que las condiciones climáticas favorecen la mineralización rápida de la materia orgánica, por lo cual esta escasea en los suelos vírgenes y decrece rápidamente en los suelos cultivados, debido a estas condiciones también se observa que la vegetación no presenta importancia como factor formador de suelo pero si como agente de protección del mismo contra la acción erosiva del viento y del agua (Capitanelli, 1967).

Se tomaron muestras de suelo correspondiente al área de estudio, en el año 2009, y se analizó la salinidad, fertilidad y textura de las mismas, según muestra la Tabla N° 6. El análisis se realizó en la Cátedra de Edafología, Facultad de Ciencias Agrarias.

Tabla N° 6: Análisis de salinidad, fertilidad y textura de una muestra de suelo del área de estudio, distrito Perdriel.

Muestra/Determinación	1	2	3
Textura	Franco	Franco arenoso	Franco arenoso
Profundidad (cm)	0-30	30-60	>60
Vol. Sedimentación (cm ³ %g)	96	84	88
pH	7,6	7,6	7,8
Conductividad eléctrica (dS/m)	1,7	1,3	1,2
Nitrógeno total (mg/kg)	550	360	310
Fósforo ext. carbónica 1:10 (mg/kg)	9,4	2,1	3,5
Potasio intercambiable(mg/kg)	440	140	1.100
Materia orgánica(g%g)	0,8	0,4	0,3
Relación C/N	8,6	6,6	4,9
Limo americano(2 a 50µm)	24	26	50
Limo internacional (2 a 20µm)	9	17	24
Arcilla (menor de 2µm)	6	5	1

Los valores de pH que se observan en el análisis, teniendo en cuenta las distintas profundidades, rondan la neutralidad y tienden a ser más básicos a medida que aumenta la profundidad.

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

El suelo no presenta problemas de salinidad, porque los valores que se observan en el análisis no superan los 4 dS.m⁻¹ (Fernández Linares *et al.*, 2006). Según el criterio para evaluar la salinidad, que se observa en la publicación de Fernández Linares *et al.* (2006), los valores de conductividad de las muestras analizadas corresponden a un suelo no salino (valores entre 0-2 dS.m⁻¹).

En cuanto a las características de fertilidad, el suelo presenta valores menores al 1% de materia orgánica, estos valores son representativos de las zonas áridas y se clasifican en la categoría de bajo contenido de materia orgánica (Fernández Linares *et al.*, 2006). En cuanto a los niveles de los minerales analizados, el nitrógeno se encuentra en gran cantidad en el suelo ya que los contenidos de nitrógeno edáfico fluctúan, en general, entre 200 a 4 000 mg.kg⁻¹ (Pérez Valenzuela, 1999) y los valores del análisis son superiores a estos en la capa superficial disminuyendo a medida que aumenta la profundidad. El valor del fósforo en superficie se encuentra en la categoría de contenido medio (Fernández Linares *et al.*, 2006), disminuyendo notablemente en profundidad por la absorción del mineral por parte de las raíces. Los valores de potasio son bajos comparados con el valor promedio para las zonas áridas, este por lo general es mayor a 25 000 mg.kg⁻¹ (Pérez Valenzuela, 1999).

La relación C/N que se observa es máxima en la superficie y disminuye con la profundidad, y como los valores que se observan son menores a 17 se produce mayormente mineralización de los nutrientes, produciéndose pérdida de nitrógeno por este proceso (Pérez Valenzuela, 1999).

Debido a que el departamento de Luján de Cuyo pertenece a una zona árida, donde el recurso agua se presenta de forma escasa y se disputa entre las distintas actividades desarrolladas, es importante hacer una descripción del uso de este recurso y de la tierra en la zona. Los establecimientos industriales son 106 de los cuales 45 son grandes empresas, las bodegas inscriptas son 118 y las elaboradoras 99 según datos del año 2006 (Fasciolo *et al.*, 2010). De acuerdo al Censo Nacional Agropecuario (1988) las explotaciones agropecuarias ocupan un área de 43 660,9 has., correspondiendo un 65,6% a aquellas que tienen una extensión entre 5,1 a 100 has. En cuanto a la población del departamento, el INDEC (1991) registró que un 26,6% corresponde a población rural y según datos del año 2001 el 51% cuenta con agua caliente y cloaca.

Se puede decir que las actividades del departamento que mayor venta producen, corresponden a los siguientes sectores: vitivinícola, destilería, metalmecánica,

industrias de base minera, química y petroquímica (cuenta con una extensión de 500 has. y con una estación transformadora de energía eléctrica) (IDITS, 2005).

En el apartado siguiente se detalla el sistema de plantación y material vegetal utilizado en el cultivo, además de la metodología desarrollada para la obtención de los resultados.

5. Materiales y Métodos

5.1 Material vegetal utilizado y manejo de la parcela

Las parcelas implantadas con el cultivo energético forman parte del proyecto bianual “Cultivo energético con forestales: efectos del ciclo de corta; fijación y balance de carbono” llevado a cabo por la cátedra de Dasonomía (Facultad de Ciencias Agrarias) y financiado por la Secretaría de Ciencia, Técnica y Posgrado de la Universidad Nacional de Cuyo. La plantación se realizó en el año 2009, utilizando como material vegetal estacas leñosas de *Populus x canadensis* clon ‘Conti 12’ de 30 cm de longitud, este clon fue seleccionado por su productividad y adaptación a las características de la región, y se colocaron dejando 1 ó 2 yemas sobre la superficie del suelo.

El marco de plantación utilizado fue en una doble hilera distanciada a 75 cm, luego a 150 cm otra doble hilera, y así alternativamente, con un distanciamiento entre plantas de 70 cm en el sentido de la hilera. Este sistema de plantación fue propuesto por la Forestry Commission U.K., obteniendo así una densidad de plantación de 15 000 pl.ha⁻¹.

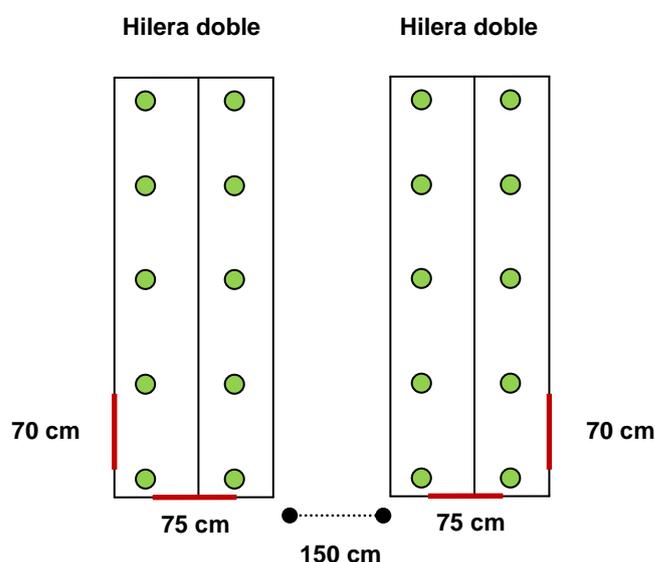


Figura N° 4: Marco de plantación utilizado en las parcelas del cultivo de ‘Conti 12’.

Durante el primer año del cultivo, la aplicación del riego en todo el cuartel fue por superficie y de manera uniforme, aplicando las mismas láminas e intervalos de riego y una vez finalizado el primer ciclo vegetativo, en invierno, se efectuó el recepe a la altura de la base de todas las plantas y se lo dejó vegetar libremente por dos años, realizando el control de malezas de forma manual.

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon ‘Conti 12’, Perdriel, Mendoza.”

Se realizaron estudios previos de suelo en el lugar del ensayo, la textura del mismo es franco a franco arenoso y además se determinó salinidad y fertilidad (Tabla N° 6).

5.2 Metodología de trabajo

5.2.1 Muestreo a Campo

Los datos se obtuvieron a partir de la biomasa aérea y subterránea producida por el cultivo energético de `Conti 12` de dos años de edad, ubicado en el distrito de Perdriel. Los mismos se determinaron en una muestra de 80 plantas, de acuerdo con el siguiente procedimiento: se midió el diámetro de base de todos los brotes producidos por cada planta con calibre digital (con precisión de mm), para luego generar una función alométrica o estimadora de biomasa que permita conocer la biomasa (peso fresco) aérea producida, en correspondencia con el diámetro. Posteriormente, se tomó una submuestra de 22 plantas, cada una de ellas se dividió en biomasa de brotes, biomasa tocón (correspondiente tanto a la parte aérea como a la parte subterránea del mismo) y biomasa de raíz.

Luego se determinó el peso fresco y seco de los brotes con una balanza (precisión de gramo), y se utilizó el peso fresco para elaborar la función estimadora de biomasa y después validarla con los resultados obtenidos con la balanza.

Para cuantificar la biomasa subterránea se procedió a desenterrar las raíces de las 22 plantas, correspondientes a la submuestra, con una retroexcavadora. Se limpiaron y pesaron con balanza (precisión de gramo). También se estimó, debido al proceso destructivo de extracción, el porcentaje de pérdida de raíces, siendo este entre un 10 a un 30% y se añadió, en términos de peso (kg), a cada raíz el porcentaje de pérdida que presentaba en función de su peso fresco.

Se tomaron cinco muestras de suelo a una profundidad de 30 cm, de las cuales tres muestras pertenecían al cultivo y dos a la parte inculca, esta última presenta una vegetación típica de la zona y no ha sido cultivada, por lo menos, en los últimos 10 años. El muestro de suelo se realizó con la intención de identificar la materia orgánica y carbono del suelo del cultivo y de la parcela inculca.

También se cuantificó el porcentaje de fallas del cultivo, se observó la cantidad de plantas sobrevivientes por hilera y se calculó el porcentaje de mortalidad con respecto al total de plantas que inicialmente había por hilera, dando un valor de 15% de fallas. Los datos de producción de biomasa y cantidad de dióxido de carbono fijado y liberado se encuentran en función de este porcentaje de fallas y del turno de corta (2 años).

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

5.2.2 Procesamiento de datos y muestras

5.2.2.1 Ajuste de función estimadora de biomasa

La función estimadora de biomasa (función alométrica) del cultivo se realizó utilizando el software estadístico InfoStat versión estudiantil 2011. Se aplicó, para su elaboración, una regresión simple utilizando un ajuste cuadrático, entre la variable dendrométrica correspondiente al diámetro de la base (mm) de los brotes y el peso fresco real (kg) de los mismos. El nivel de significancia seleccionado para las pruebas de hipótesis del modelo de regresión fue $\alpha = 0,05$. La bondad de ajuste del modelo se comprobó a través del coeficiente R^2 y el análisis de los residuos estandarizados.

El modelo que se ajustó permite estimar la biomasa forestal (kg materia fresca.ha⁻¹) del cultivo de 'Conti 12' para la zona de Perdriel, teniendo en cuenta que para otros sitios el cultivo puede no presentar las mismas características y el modelo de ajuste resulte diferente.

El peso seco de la biomasa se determinó llevando los brotes, tocones y raíces, de las 22 plantas cosechadas, a estufa a 105 °C de temperatura hasta peso constante. El peso, tanto fresco como seco, de la biomasa aérea y subterránea, se expresó tanto en kg.pl⁻¹ como en t.ha⁻¹.

Luego de que se realizó el peso seco de la biomasa, se tomó una muestra de cada una de las partes de la planta (brote, tocón y raíz) y se las llevó al aserradero de la Facultad de Ciencias Agrarias donde se las trituró hasta aserrín para realizar el análisis de carbono fijado en la biomasa.

5.2.2.2 Análisis de carbono en la biomasa

Este análisis se realizó en el laboratorio de la Cátedra de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNCuyo. Utilizando el método llamado "Esquema analítico de Weende", el cual se usa para determinar la calidad de los alimentos que se destinan al consumo animal y consiste en la determinación analítica de Humedad (total y actual), Cenizas (contenido mineral), Proteínas totales, Extracto etéreo y Fibra bruta, también se puede determinar el Extracto no Nitrogenado por diferencia de 100 con los anteriores.

$$\text{Ext. no N(\%)} = 100 - (\text{Hum.(\%)} + \text{Ceniz.(\%)} + \text{Prot. tot.(\%)} + \text{Gras.(\%)} + \text{Fibra(\%)})$$

donde;

Ext. no N(%): porcentaje de extracto no nitrogenado

"Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon 'Conti 12', Perdriel, Mendoza."

Hum.(%): porcentaje de Humedad

Ceniz.(%): porcentaje de cenizas (contenido mineral)

Prot. tot.(%): porcentaje de proteínas totales

Gras.(%): porcentaje de grasas (extracto etéreo)

Fibra(%): porcentaje de fibras

Este método se modificó para obtener la cantidad de carbono (%) presente en la biomasa (1).

$$C\% = [100 - (\%Hum + \%Ceniz.)] * 0,58 \quad (1)$$

donde;

%C= porcentaje de carbono presente en la muestra.

%Hum= porcentaje de humedad presente en la muestra.

%Ceniz.= porcentaje de cenizas remanente.

0,58= factor que indica la proporción de carbono en la biomasa.

5.2.2.3 Análisis en laboratorio de carbono en suelo

Para cuantificar el carbono orgánico presente en el suelo se analizaron las muestras de suelo por el método volumétrico Walkley-Smolik, en el laboratorio de la Cátedra de Edafología de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNCuyo. Este método se basa en la oxidación de la materia orgánica mediante el agente oxidante dicromato de potasio.

El porcentaje de carbono se obtuvo a partir del cálculo de la materia orgánica (2) presente en la muestra.

Porcentaje de materia orgánica presente en la muestra de suelo:

$$MO\% = [1 - (M/B)] * (12/4000) * (100/77) * (100/58) * (100/g. muestra en los 25 ml.) \quad (2)$$

donde;

MO%= porcentaje de materia orgánica en el suelo.

M= ml. gastados en la muestra problema.

B= ml. gastado en la muestra testigo.

12/4000= peso del miliequivalente de carbono en gramos.

100/77= eficiencia de la oxidación de este método.

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

100/58= relación que lleva el dato de carbono a materia orgánica.

El valor de materia orgánica se multiplicó luego por la constante 0,58; que representa el carbono presente en suelo, y se obtuvo el porcentaje de carbono presente en el mismo (%C).

5.2.2.4 Determinación de las toneladas de materia seca producidas por el cultivo y de las toneladas de carbono y dióxido de carbono fijado en el mismo

Para la determinación de las toneladas de materia seca producidas por el cultivo se multiplicó el peso seco promedio por planta (kg ms.pl^{-1}) por la cantidad de plantas sobrevivientes por hectárea en el cultivo, para lo cual se observó previamente el porcentaje de fallas del sistema. El valor se expresó como toneladas de materia seca por hectárea del cultivo (t ms.ha^{-1}) (3).

Toneladas de materia seca por hectárea obtenidas del cultivo:

$\text{t ms.ha}^{-1} \text{ c/fracción} = \text{t ms (brote, tocón, raíz)} * \text{d real cultivo}$

$\text{t ms.ha}^{-1} \text{ cultivo} = \sum \text{t ms.ha}^{-1} \text{ (brotes, tocón, raíz)} \quad (3)$

donde;

$\text{t ms.ha}^{-1} \text{ c/fracción}$: producción de materia seca por hectárea correspondiente a la fracción de brotes, tocón y raíz.

$\text{t ms.ha}^{-1} \text{ cultivo}$: producción de materia seca por hectárea correspondiente a la totalidad del cultivo.

d real cultivo: número de plantas sobrevivientes por hectárea.

Luego, al valor calculado de toneladas de materia seca de brotes, tocón y raíz se lo multiplicó por el contenido de carbono de cada fracción, obtenido a partir del análisis de laboratorio, y se obtuvo el valor correspondiente de carbono fijado por cada una de estas partes y la cantidad de carbono fijado por el cultivo en una hectárea (4). Posteriormente, se hizo la conversión de carbono a dióxido de carbono y se obtuvieron las toneladas de dióxido de carbono fijado por el cultivo (este valor se expresó como $\text{tCO}_2\text{fijado.ha}^{-1}$) (5).

Cantidad de carbono fijado por el cultivo:

$\text{tC.ha}^{-1} \text{ c/f} = \text{t ms.ha}^{-1} \text{ c/f} \times \%C$

$\text{tC.ha}^{-1} \text{ cultivo} = \sum (\text{tC.ha}^{-1} \text{ c/f}) \quad (4)$

donde;

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

tC.ha⁻¹ c/f: toneladas de carbono por hectárea fijado en cada fracción de la planta.

tC.ha⁻¹ cultivo: toneladas de carbono por hectárea fijado por la totalidad del cultivo.

%C: porcentaje de carbono presente en cada fracción de la planta.

Para la conversión de toneladas de carbono en dióxido de carbono, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{tCO}_2 \text{ fijado.ha}^{-1} = \text{tC.ha}^{-1} \times (44/12) \quad (5)$$

donde;

tCO₂ fijado.ha⁻¹ = toneladas de dióxido de carbono fijado por hectárea del cultivo.

tC.ha⁻¹ = toneladas de carbono por hectárea fijado por el cultivo.

(44/12)= constante.

5.2.2.5 Determinación de carbono en suelo

El carbono presente en el suelo se calculó haciendo una conversión de unidades, se llevó la cantidad de carbono presente en 100 gramos de suelo (g%g) al peso de una superficie de una hectárea y 30 cm de profundidad de suelo (7). Para ello, primero se cuantificó el peso de la capa arable para esa superficie y profundidad (6). El valor del carbono calculado se expresó como toneladas de carbono en suelo por hectárea (tCsuelo.ha⁻¹).

Cálculo del peso de la capa arable de suelo:

$$\text{PCA} = d \text{ aparente} \times \text{Prof.} \times \text{Sup.} \quad (6)$$

donde;

PCA: peso de la capa arable, expresado en t.ha⁻¹.

d aparente: densidad aparente expresada en t.m⁻³.

Prof.: profundidad de suelo expresada en m.

Sup.: superficie de una hectárea expresada en m².

Conversión a toneladas de carbono por hectárea:

$$\text{tCsuelo.ha}^{-1} = [(\text{PCA} \times \text{C muestra(g)}) \times 1/100] \times 1/1.10^6 \quad (7)$$

donde;

tCsuelo.ha⁻¹: toneladas de carbono presente en el suelo por hectárea de cultivo.

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

PCA: peso de la capa arable de suelo, expresada en gramos.

C muestra: carbono presente en la muestra de suelo, obtenido a partir del análisis de materia orgánica, expresado en gramos de carbono.

1/100: hace referencia a los 100 g de suelo donde se encuentran los gramos de carbono, obtenidos en el análisis de laboratorio.

1/1.10⁶: constante para expresar el resultado en toneladas.

5.2.2.6 Determinación del balance de dióxido de carbono del cultivo

En primera instancia se asume que el contenido de carbono que se encuentra inicialmente en la biomasa será el mismo que se liberará al producirse la combustión completa de la misma. Esto es importante para la cuantificación del balance de dióxido de carbono del cultivo energético.

La biomasa se clasificó, con fines prácticos, en biomasa utilizable (brotes) y biomasa remanente (tocón y raíces). Para el cálculo del balance sólo se tuvo en cuenta el dióxido de carbono fijado y liberado por la biomasa, sin incluir aquel emitido por las labores culturales del cultivo.

El balance de dióxido de carbono se cuantificó por diferencia de las toneladas totales de CO₂ fijado por el cultivo y las toneladas del mismo liberadas por la combustión completa de la biomasa utilizable (brotes) (8). Se tuvo en cuenta sólo este componente de la planta ya que es el que se utilizará para generar bioenergía y el resultado se expresó como toneladas de dióxido de carbono remanente en el sistema por hectárea (tCO₂rem.ha⁻¹).

Cuantificación del balance de dióxido de carbono:

$$tCO_2rem.ha^{-1} = (tCO_2fijado.ha^{-1} \text{ cultivo}) - (tCO_2liberado.ha^{-1} \text{ brotes}) \quad (8)$$

donde;

tCO₂rem.ha⁻¹: son las toneladas de dióxido de carbono que permanecen en el sistema del cultivo después de la cosecha de brotes.

tCO₂fijado.ha⁻¹ cultivo: son toneladas de dióxido de carbono fijado por el cultivo, teniendo en cuenta todos los componentes de la planta.

tCO₂liberado.ha⁻¹ brotes: son las toneladas de dióxido de carbono liberado por la combustión completa de la biomasa utilizable (brotes).

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

Por la aplicación de la metodología, aquí descrita, sobre los datos crudos o semi-procesados obtenidos a campo, se consiguieron los resultados que se detallan a continuación.

6. Resultados

6.1 Datos generales del cultivo

Se expresan a continuación los datos generales del cultivo energético de 'Conti 12', algunos obtenidos por medición directa a campo y otros como resultado del procesamiento de los mismos.

Tabla N° 7: Valores mínimos, promedio y máximos del diámetro base (mm) de los brotes, el número de estos por planta y su altura (cm) (n=80).

	Mínimo	Promedio	Máximo
Diámetro base(mm)	7,2	18,1	52,0
N° brotes	1,0	4,0	10,0
Altura (cm)	100,0	239,4	525,0

Tabla N° 8: Valores mínimos, promedio y máximos del peso seco (kg ms.pl⁻¹) correspondiente a las distintas fracciones analizadas de la planta (brote, raíz y tocón) (n=22).

	Mínimo	Promedio	Máximo
Brote (kg ms/pl)	0,12	0,81	2,02
Raíz (kg ms/pl)	0,05	0,28	0,59
Tocón (kg ms/pl)	0,09	0,52	1,36
Total(kg ms/pl)	0,27	1,61	3,97

Tabla N° 9: Porcentaje de materia seca (%ms) de cada fracción de la planta (brote, raíz, tocón) con respecto al peso seco total promedio por planta (kg ms.pl⁻¹).

	PS prom.(kg)	% Mín. PS/PSTprom.	%Prom. PS/PSTprom.	% Máx. PS/PSTprom.
Brote	0,79	29,93	48,99	55,42
Raíz	0,30	13,95	18,78	26,28
Tocón	0,52	26,49	32,23	43,8
Total	1,61			

Tabla N° 10: Producción total de biomasa (t ms.ha⁻¹) en función de la densidad del cultivo.

kg ms prom./pl	Densidad	T ms/ha
1,61	15 000	24,15
1,61	12 750	20,50

Los datos de biomasa de brotes, raíz y tocón por hectárea, se presentan en la Tabla N° 11 y corresponden a la densidad real del cultivo con un 15% de fallas.

Tabla N° 11: Producción de biomasa de brotes, raíz y tocón (t ms.ha⁻¹) y su porcentaje en peso con respecto a la producción total del cultivo.

	t ms/ha	% Peso Seco (c/fracción)
Brotos	10,1	49,3
Raíz	3,8	18,5
Tocón	6,6	32,2
Total	20,5	100,0

Si se considera como biomasa utilizable (BU) a los brotes, con una producción de 10,1 t ms.ha⁻¹ y como biomasa remanente (BR) a la fracción de raíz junto con la de tocón, con 10,4 t ms.ha⁻¹, entonces se observa que ambas partes son relativamente similares en cuanto a producción de biomasa, con una relación de BU/BR de 0,97:1.

6.2 Función alométrica o estimadora de biomasa

6.2.1 Representación gráfica del modelo

La siguiente figura representa la relación entre la variable alométrica, que en este caso corresponde al diámetro de base (mm) y el peso fresco real de los brotes (kg).

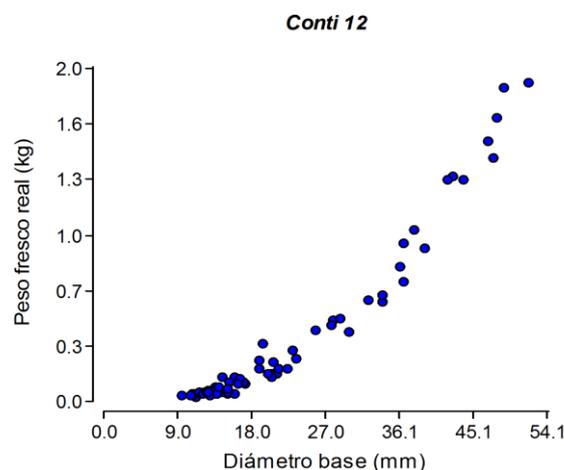


Figura N° 5: Relación entre diámetro base (mm) y Peso fresco real (kg)

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

Al relacionar el diámetro base (mm) de los brotes con su correspondiente peso fresco real (kg), se advierte según el gráfico de dispersión (Figura 4) que su relación es de tipo curvilínea.

Para ajustar el modelo se realizó un análisis de regresión simple, se observó que la función que mejor se ajustaba, para las variables, correspondía a un binomio cuadrático. Por lo que, el modelo resultante fue: $PF = 0,098 - 0,016.Db + 0,001.Db^2$, con $R^2=0,99$; $n=73$.

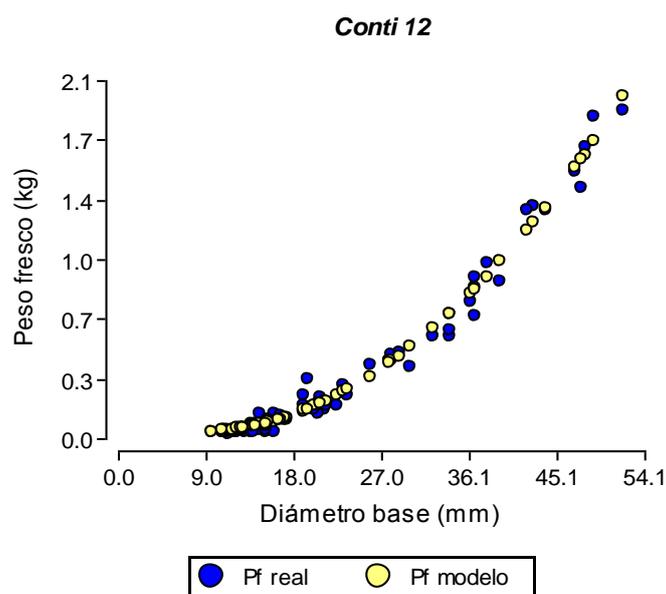


Figura N° 6: Relación entre el diámetro de base (mm) de brotes de Conti 12, con su correspondiente peso fresco (kg) y su estimación con $PF = 0,098 - 0,016.Db + 0,001.Db^2$ ($R^2=0,99$; $n=73$).

6.3 Carbono presente en la biomasa y dióxido de carbono fijado por el cultivo

Los resultados del análisis realizado en laboratorio sobre el contenido de carbono presente en la biomasa seca de las distintas fracciones de la planta se presentan a continuación.

Tabla N° 12: Porcentaje de carbono presente en brotes, tocón y raíz.

	%Carbono
Brotes	55,6
Tocón	53,6
Raíz	52,9

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon ‘Conti 12’, Perdriel, Mendoza.”

Tabla N° 13: Cantidad de carbono presente en la biomasa ($tC \cdot ha^{-1}$) y de dióxido de carbono fijado ($tCO_2 \text{ fijado} \cdot ha^{-1}$) por el cultivo y por las distintas fracciones de la planta.

	tC/ha	tCO ₂ fijado/ha
Brote	5,6	20,5
Raíz	2,0	7,3
Tocón	3,6	13,2
Total	11,2	41,1

En la siguiente figura se expresa el porcentaje de dióxido de carbono fijado, en una hectárea, por las distintas partes de la planta (brotes, raíz y tocón).

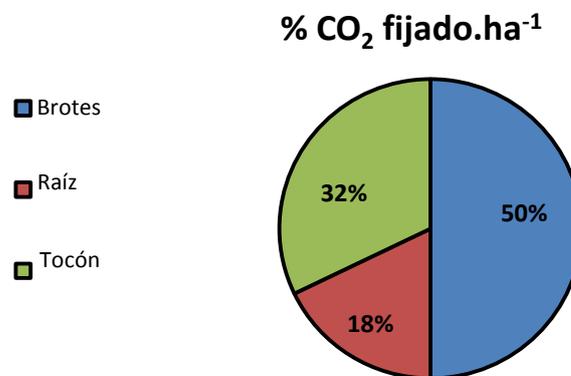


Figura N° 7: Porcentaje de dióxido de carbono fijado por cada fracción del cultivo (brote, raíz y tocón) en una superficie de una hectárea.

6.4 Carbono presente en el suelo

A partir del análisis de laboratorio, realizado para cuantificar el contenido de materia orgánica y posteriormente el carbono del suelo del cultivo y de la parte inculca, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla N° 14: Porcentaje de materia orgánica y de carbono presente en el suelo del cultivo de `Conti 12` y de la parcela inculca.

Muestras suelo	%MO (g%g C)	%MO promedio	Muestras suelo	%C org.	%C promedio
Cultivo	1,42	1,71	Cultivo	0,82	1,0
Cultivo	2,08		Cultivo	1,21	
Cultivo	1,63		Cultivo	0,95	
Inculca	1,34	1,48	Inculca	0,78	0,9
Inculca	1,61		Inculca	0,93	

La Figura N° 8 ejemplifica el porcentaje de carbono promedio calculado a partir de los resultados de materia orgánica de las muestras analizadas en laboratorio.

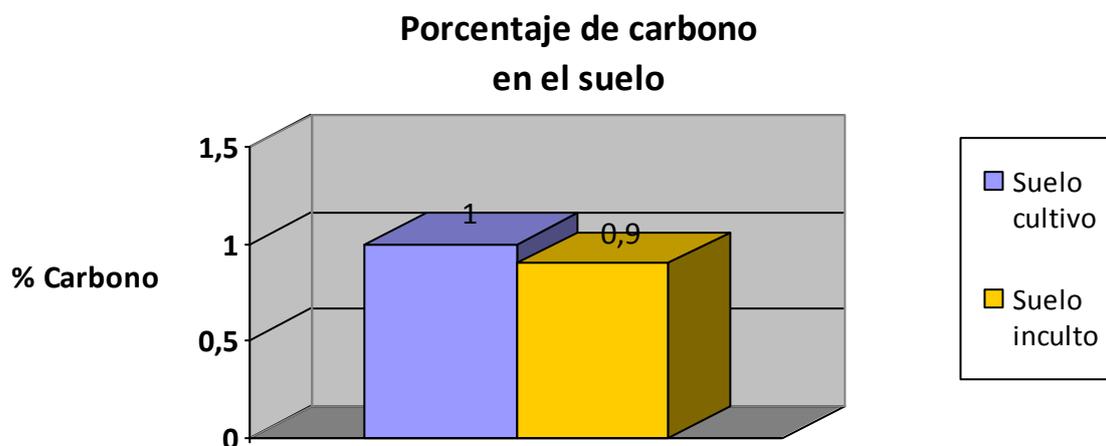


Figura N° 8: Porcentaje de carbono presente en el suelo del cultivo y en suelo inculca.

Tabla N° 15: Toneladas de carbono (tC.ha⁻¹) y dióxido de carbono (tCO₂.ha⁻¹) presentes en el suelo del cultivo.

	tC.ha ⁻¹	tCO ₂ .ha ⁻¹
Suelo cultivo	40,5	148,5

6.5 Balance de dióxido de carbono

La siguiente tabla muestra el balance de dióxido de carbono obtenido de la diferencia entre aquél fijado por la biomasa del cultivo y el emitido por la combustión completa de la biomasa utilizable (brotes).

Tabla N° 16: Balance de la toneladas de dióxido de carbono fijado por el sistema y las emitidas por la biomasa utilizable ($tCO_2 \cdot ha^{-1}$).

	tCO ₂ fijado/ha	tCO ₂ emitido/ha	Balance tCO ₂ /ha
Brotes	20,5	20,5	+ 20,5
Raíz	7,3	0	
Tocón	13,2	0	
Total	41,1	20,5	

7. Discusión

A partir de los resultados obtenidos se confirman las hipótesis planteadas y se puede decir que el cultivo energético de álamo clon `Conti 12` contribuye a la disminución del dióxido de carbono del ambiente, fijando el mismo en la biomasa que lo compone. A continuación se discuten los resultados encontrados en este trabajo con los valores y conclusiones elaboradas por otros autores en estudios similares consultados.

Características del cultivo y producción de biomasa

De acuerdo con la observación directa a campo y los datos obtenidos de brotes por planta se puede decir que, en general, este clon presentan buena capacidad de rebrote, coincidiendo con lo mencionado por Baettig *et al.* (2010). En el sitio de Perdriel las plantas presentan mayor rebrote, 4 brotes.pl⁻¹ en promedio, que el cultivo ubicado en el distrito del Pastal cuyo valor promedio de brotes por planta es de 1,9 (Bustamante *et al.*, 2009). En cuanto al diámetro de base (mm) de los mismos se observa que el valor promedio, de 18,1 mm, resulta ser menor en comparación con aquél encontrado en el departamento de San Carlos, cuyas plantas presentan un diámetro es de 26,3 cm aunque en este caso tienen 10 años de edad (Bustamante *et al.*, 1995). Para la variable altura el valor promedio es de 239,4 cm y también resulta menor que el encontrado por Bustamante *et al.* (2009) para el mismo clon en la plantación ubicada en el distrito El Pastal. Esto puede deberse a que las condiciones del sitio influyen en las características del cultivo como menciona Baettig *et al.* (2010).

La discusión de los resultados obtenidos en este estudio sobre la producción de biomasa, cantidad de carbono y dióxido de carbono fijado resulta difícil de comparar con la bibliografía encontrada, debido a que las variables como: especie, densidad de plantación, sitio y turno de corta difieren ampliamente con los trabajos citados. De igual forma se exponen los resultados encontrados en otros estudios y se compara en la medida que esto resulte posible.

La fracción de los brotes es la que presenta el mayor valor de peso seco por planta y por hectárea, en comparación con las otras fracciones (tocón y raíces), esto se corresponde con lo expresado por Alvarez (2008) y Chidiak *et al.* (2003). Aunque el valor en porcentaje que representa esta fracción de la biomasa con respecto a la total, que según Alvarez (2008) se encuentra entre un 55 y 77%, en este estudio el resultado se aproxima al 50% por lo que no coincide con lo que expresa el autor. El peso promedio de brotes por planta representa el 48,9% del peso seco promedio total

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

por planta. Si se compara este valor, de peso seco por planta, con los obtenidos para el mismo clon en las parcelas ubicadas en el distrito El Pastal ($2,74 \text{ kg.pl}^{-1}$ en una densidad de $10\ 000 \text{ pl.ha}^{-1}$ y $2,51 \text{ kg.pl}^{-1}$ en $20\ 000 \text{ pl.ha}^{-1}$), se puede ver que resulta menor, según resultados obtenidos por Bustamante *et al.* (2009). Esto puede deberse a las características del sitio y a la forma de riego del cultivo, el cual se hace utilizando agua residual tratada de Campo Espejo.

El resultado de biomasa seca de brotes de este estudio ($10,1 \text{ t ms.ha}^{-1}$) también resulta ser menor que los valores obtenidos por Arias-Giraldo *et al.* (2007) de $17,45 \pm 4,67 \text{ t ms.ha}^{-1}$ y Méndez-González *et al.* (2011) de $39,36 \text{ t.ha}^{-1}$. Si bien las especies de estos estudios son distintas al igual que el turno de corta, en el caso de aquel realizado por Arias-Giraldo *et al.* (2007) la especie cultivada es de rápido crecimiento al igual que el clon 'Conti 12' y las condiciones de densidad de plantación resultan también ser elevadas ($10\ 000 \text{ pl.ha}^{-1}$). Lo mismo sucede con los valores de biomasa aérea que expresa Baettig *et al.* (2010) en su informe, basándose en resultados de Nardin (2007) para diferentes clones de álamos en ensayos realizados en Italia.

Laureysens *et al.* (2005) obtiene en su estudio; para los clones 'Woltersen', 'Fritzi Pauley' y 'Trichobel'; valores de rendimiento de biomasa superiores al hallado en el presente trabajo para el clon 'Conti 12', exceptuando el clon 'IBW2' que presenta una producción menor en cuanto a toneladas de materia seca por hectárea.

Función alométrica o estimadora de biomasa

Si se aplica la función estimadora de biomasa elaborada anteriormente con los datos obtenidos para el clon 'Conti 12' en el distrito El Pastal, se puede decir que el modelo ajustado no representa la producción de biomasa aérea del cultivo ubicado en Perdriel. En el caso de El Pastal la función correspondía a un modelo logarítmico lineal, $\ln(\text{Peso}) = 1,23 + 1,67 \ln(D100)$ (Bustamante *et al.*, 2009), con previa transformación logarítmica de los datos, mientras que en el cultivo situado en Perdriel el ajuste resulta ser un binomio cuadrático y no hubo transformación previa de los datos. Por esto, la función alométrica elaborada para este cultivo permite estimar la biomasa de brotes de forma confiable para este sitio. Si se pretende aplicar este modelo en un lugar diferente entonces tiene que tenerse en cuenta el efecto del sitio y validar la función previamente.

Alvarez (2008), Arias-Giraldo *et al.* (2007) y Méndez-González *et al.* (2011) concluyen que el diámetro a la altura del pecho es una de las variables independientes que

presenta mejor correlación con la biomasa aérea, en este estudio el diámetro a la altura de la base también lo hizo.

Fijación de carbono y CO₂ en la biomasa

De acuerdo con los resultados obtenidos sobre el contenido de carbono en la biomasa se observa que los porcentajes son mayores al 50% y se encuentran dentro del rango expresado por el IPCC (1996) y el mencionado por Díaz Franco *et al.* (2007), siendo estos de 43 a 58% y 40 a 55% respectivamente, y a su vez resultan mayores que los hallados por De la Cruz Calleja (2005) y Gasol *et al.* (2009) en la biomasa de fustes para el género *Populus* y los encontrados por Pacaldo *et al.* (2012) en un cultivo energético de sauce. En cuanto a los porcentajes de carbono presentes en raíz y tocón, estos resultan también mayores que los encontrados por Pacaldo *et al.* (2012) para sauce, y por Al Afas *et al.* (2007) en los clones de álamo 'Primo' y 'Balsam Spire'.

La cantidad de carbono presente en la biomasa de brotes resulta ser mayor que la encontrada para las demás fracciones de la planta, coincidiendo con lo expresado por Chidiak *et al.* (2003). Si se compara el contenido de carbono presente en la fracción de los brotes del clon 'Conti 12' de 2 años de edad; 5,6 tC.ha⁻¹; con el encontrado por De la Cruz Calleja (2005), de 96 tC.ha⁻¹, para un cultivo de álamo clon 'I-214' de 14 años de edad y una densidad de plantación menor, se observa que el valor representa el 5,8% del contenido total de carbono expresado por el autor para esa fracción de la planta. El cultivo descrito del clon 'I-214' puede haber presentado, haciendo un cálculo estimativo, a la edad de 2 años una cantidad de carbono fijado en la biomasa aérea de 13,7 tC.ha⁻¹, la diferencia de este valor con el del cultivo de 'Conti 12' puede deberse a que las características de la plantación y el sitio son distintos.

El resultado de carbono fijado en este estudio también resulta menor que los expresados por Díaz Balteiro (2002), siendo este de 44,7 tC.ha⁻¹ para una plantación de *Populus sp.* con una densidad de 278 plantas.ha⁻¹ y un turno de corta de 14 años y con el que manifiesta Laclau (2003) en el trabajo de Chidiak *et al.* (2003) para aquél fijado en fuste de un cultivo de pino ponderosa de 18-20 años con un valor de 32,1 tC.ha⁻¹.

La cantidad de carbono fijado por la fracción de raíz del cultivo es de 2 tC.ha⁻¹, resultando menor que el encontrado por De la Cruz Calleja (2005), siendo este de 12 tC.ha⁻¹. En cuanto a la fracción del tocón no puede realizarse una comparación adecuada debido a que el autor tuvo en cuenta sólo la parte subterránea del mismo;

"Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon 'Conti 12', Perdriel, Mendoza."

para el cual manifiesta un valor de $0,8 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$; y en este trabajo la fracción del tocón incluye tanto la parte aérea como subterránea, por lo que el valor resulta ser de $3,6 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$.

La biomasa utilizable del cultivo presenta un valor de CO_2 fijado de $20,5 \text{ tCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}$, el cual resulta ser mayor que el hallado por Arias-Giraldo et al. (2007); siendo este de $5 \text{ tCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}$ para un cultivo en alta densidad de *Leucaena leucocephala* de dos años de edad. La biomasa remanente (raíz y tocón) presenta un valor de $20,5 \text{ tCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}$ resultando ser menor que el expresado por Pacaldo et al. (2012); de $56,7 \text{ tCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}$ para un cultivo energético de sauce con un turno de corta de 19 años.

Carbono en suelo

Los resultados del porcentaje de carbono en el suelo, tanto del cultivo como de la parcela inculca, son meramente descriptivos y sirven como datos de línea de base. En el suelo del cultivo las toneladas de carbono y CO_2 calculadas son de $40,5 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ y $148,5 \text{ tCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}$ respectivamente. En cuanto al carbono presente, el resultado resulta ser menor que el mencionado por Chidiak et al. (2003) de $154,9 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ y $169,5 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ en suelo de pino ponderosa y ciprés de la cordillera respectivamente; y mayor que el que expresa De la Cruz Calleja (2005); de $26,4 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ en los primeros 20 cm de suelo de un cultivo de álamo. El valor de CO_2 en suelo resulta ser menor que el que expresa Arias-Giraldo et al. (2007) de $698,1 \text{ tCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}$.

Balance de CO_2 del cultivo

Se confirma la hipótesis de que el cultivo energético de álamo 'Conti 12' presenta un balance positivo entre el CO_2 fijado por el sistema y el liberado a la atmósfera por combustión de la biomasa utilizable. Las toneladas de CO_2 que se emiten en la combustión resulta ser igual a aquella fijada previamente por la fracción de los brotes, esto ocurre si la combustión se da en forma completa. El balance resulta positivo siempre que se destine solo para combustión la fracción de los brotes, así la biomasa remanente (raíz y tocón) podría constituir, en un futuro, un sumidero de carbono en el suelo, como concluye Vande Walle et al. (2007) para los cultivos energéticos. En caso de que la totalidad de la biomasa tuviera por fin la obtención de energía, entonces, el balance sería neutro, como expresa Baettig et al. (2010), si se descartan aquellas emisiones de CO_2 propias de las labores culturales.

8. Conclusiones

La producción de biomasa del cultivo presenta valores bajos en comparación con la bibliografía consultada, esto puede deberse a la edad del mismo, al marco de plantación elevado y al sitio donde se encuentra.

La función alométrica elaborada representa de forma confiable el peso fresco de la fracción de brotes en función del diámetro de base de los mismos, para el sitio de Perdriel. Esto permite contar con una herramienta práctica a la hora de cuantificar la producción de biomasa aérea del cultivo de 'Conti 12', siempre y cuando las características y condiciones ambientales en las que se encuentra el cultivo sean similares y se realice previamente la validación del modelo.

La fracción de la planta que presenta valores mayores en cuanto a biomasa, cantidad de carbono ($tC \cdot ha^{-1}$) y CO_2 ($tCO_2 \cdot ha^{-1}$) fijado es la de los brotes, correspondiendo al 50% del CO_2 fijado por la totalidad del cultivo, el porcentaje restante queda representado por la biomasa remanente (raíz y tocón).

Si bien parte del carbono fijado por el sistema se emite a la atmósfera nuevamente por combustión de la biomasa utilizable, el CO_2 que ha sido fijado por la biomasa remanente queda en el mismo. Esta fracción de carbono se descompone lentamente en el suelo y se vuelve parte de la materia orgánica, constituyendo a futuro un sumidero de carbono. Por ello, sería importante que estos cultivos por ser una fuente de biocombustibles sólidos cuya finalidad es la generación de bioenergía, favorecieran la disminución de emisiones de CO_2 al ambiente cosechando únicamente la fracción de brotes para su posterior combustión. De esta forma, los cultivos energéticos favorecerían la fijación y permanencia de parte del CO_2 en el sistema, continuando con el ciclo de carbono y emitiendo sólo de forma parcial CO_2 a la atmósfera, a diferencia de los combustibles fósiles que presentan un aporte neto.

Además, este tipo de energía podría generarse en zonas rurales que pudieran obtener biomasa de cultivos forestales locales o de la cercanía y abastecer de calefacción a pobladores e industrias de la zona, como podría ser el caso de aquellas dedicadas a desecar alimentos. Para ello, habría que realizar un análisis y planificación previa para que la central bioenergética coexistiera con las demás actividades (cultivos e industrias), pudiendo situarse en tierras no aprovechadas y/o poco fértiles. También podría utilizarse agua residual tratada para el riego de los cultivos y de esta forma reducir el conflicto entre actividades por el uso del recurso agua. Así, se lograría una

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon 'Conti 12', Perdriel, Mendoza.”

mejor ordenación del territorio y además se disminuirían los costos y emisiones de gases producidas por el transporte de materia prima.

También se podría pensar, a partir de los resultados encontrados sobre fijación de CO₂, en aumentar el área cultivada con forestales e incluir a dichos cultivos dentro de los mecanismos de desarrollo limpio del Protocolo de Kyoto, por medio de la venta de bonos de carbono a países industrializados.

Además, la metodología desarrollada en este trabajo podría aplicarse en un futuro a otros cultivos energéticos y evaluar que especies y densidades de plantación son más convenientes en cuanto a producción de biomasa y fijación de CO₂.

Anexos

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon ‘Conti 12’, Perdriel, Mendoza.”

Noel Alcover

Anexo I

Clasificación de RIVERSIDE (U.S.) sobre el peligro de salinización de los suelos según la conductividad eléctrica del agua utilizada para riego.

Clases	Peligro de salinización	Conductividad eléctrica (µs/cm a 25°C)	Contenido de sales totales (g/l)
C1	Bajo	< 250	< 0.15
C2	Moderado	250 – 750	0.15 – 0.50
C3	Medio	750 – 2250	0.50 – 1.15
C4	Alto	2250 – 4000	1.15 – 2.50
C5	Muy Alto	4000 – 6000	2.50 – 3.50
C6	Excesivo	> 6000	> 3.50

Fuente: Jarsun, 2008. Manual de uso e interpretación de aguas, Secretaría de Ambiente, Córdoba, Argentina.

Clasificación RIVERSIDE de aguas en función del Carbonato de Sodio Residual (C.S.R.)

C.S.R.	CLASIFICACIÓN
< 1.25	Aguas de buena aptitud para el riego
1.25 – 2.5	Aguas de aptitud dudosa, se requieren prácticas de manejo y enyesado
> 2.5	No aptas para el riego

Fuente: Jarsun, 2008. Manual de uso e interpretación de aguas, Secretaría de Ambiente, Córdoba, Argentina.

Anexo II

Clasificación de los suelos de Luján de Cuyo (Mendoza) según Soil Taxonomy.

Según la clasificación Soil Taxonomy, en el departamento de Luján de Cuyo se pueden encontrar los siguientes tipos de suelos:

Orden	Suborden	Gran Grupo	Subgrupo
Entisoles	- Fluventes - Ortentes	- Torrifluventes - Torriortentes	- típicos -ácuico durortídicos

Fuente: Moscatelli G., Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, 1990.

- Torrifluventes típicos:

Presentan una sucesión de capas que se diferencian por textura. En algunos perfiles se observa un epipedón ócrico débilmente desarrollado. Son suelos profundos con textura dominante franco arenosa a franco arcillo limosa, de consistencia variable y ligera concentración de calcáreo en distintas profundidades.

La salinidad y alcalinidad es muy variable, siendo los perfiles desde no salinos ni alcalinos hasta poder caracterizarse como fases moderadas y fuertemente salinas.

Los torrifluventes típicos tienen una amplia distribución en las áreas fluviales y lacustres y en el pedemonte (Moscatelli, 1990).

- Torriortentes ácuicos durortídicos:

Tienen una secuencia de capas poco diferenciadas de consistencia firme en húmedo y textura de franco arcillosa a arcillosa. Son suelos moderadamente profundos con problemas de drenaje, por lo que están húmedos o saturados con agua. Son altamente sódicos con bajo contenido de materia orgánica y es característico que una parte del perfil esté fuertemente cementada. Presentan evidencias de erosión eólica ligera (Moscatelli, 1990).

Anexo III

Análisis estadístico (salida del software InfoStat)

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Pfr	73	0.99	0.99	4.1E ⁻⁰³	-201	-191

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	9.8E ⁻⁰²	4.1E ⁻⁰²	1.6E ⁻⁰²	1.8E ⁻⁰¹	2	0.0203	
Db	-1.6E ⁻⁰²	3.5E ⁻⁰³	-2.3E ⁻⁰²	-9.4E ⁻⁰³	-5	<0.0001	24
Db^2	1.0E ⁻⁰³	6.1E ⁻⁰⁵	8.8E ⁻⁰⁴	1.1E ⁻⁰³	17	<0.0001	272

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	17	2	8	2385	<0.0001
Db	16	1	16	4496	<0.0001
Db^2	1	1	1	274	<0.0001
Error	2.5E ⁻⁰¹	70	3.5E ⁻⁰³		
Total	17	72			

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	17	2	8	2385	<0.0001
Db	17	2	8	2385	<0.0001
Error	2.5E ⁻⁰¹	70	3.5E ⁻⁰³		
Total	17	72			

Anexo VI

Referencias de unidades, símbolos y siglas

$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$: microSiemens por centímetro

$\text{cal}\cdot\text{g}^{-1}$: caloría por gramo

CaO: óxido de calcio

D100: diámetro a la altura de 1 metro (100 cm)

DAP: diámetro a la altura del pecho

$\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$: deciSiemens por metro

DAT: diámetro a la altura del tocón

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

$\text{g}\%g$: gramo por ciento gramo

ha. y has.: hectárea y hectáreas

IFPRI: Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias

INDEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos (Argentina)

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

K_2O : óxido de potasio

$\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$: kilocaloría por kilogramo

$\text{kg}\cdot\text{pl}^{-1}$: kilogramos por planta

me/L: miliequivalentes por litro

ONU-Energía: Organización de la Naciones Unidas- Energía

P_2O_5 : óxido fosfórico o pentóxido de difósforo

$\text{pl}\cdot\text{ha}^{-1}$: plantas por hectárea

RAS: Relación de Adsorción de Sodio

Relación C/N: relación carbono-nitrógeno

$\text{tC}\cdot\text{ha}^{-1}$: toneladas de carbono por hectárea

$\text{tCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}$: toneladas de dióxido de carbono por hectárea

$\text{tms}\cdot\text{ha}^{-1}$: toneladas de materia seca por hectárea

UNCuyo: Universidad Nacional de Cuyo

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon ‘Conti 12’, Perdriel, Mendoza.”

Bibliografía

Achinelli F. “Silvicultura de álamos y sauces en la Pampa húmeda”. Jornadas de Salicáceas 2006. Buenos Aires. Disponible en <http://64.76.123.202/new/0-0/forestacion/biblos/JS%202006/pdf%20tt/Achinelli.pdf> Publicado: 2006. Consultado: 14/05/2012

Al Afas N., Marron N., Zavalloni C., Ceulemans R. 2008. “Growth and production of a short-rotation coppice culture of poplar- IV: Fine root characteristics of five poplar clones”. Revista Biomass & Bioenergy - BIOMASS BIOENERGY, Vol. 32, N° 6, pp. 494-502.

Alvarez G. 2008. “Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia”. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Tesis de Magister de la Escuela de Posgrado del CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Arias-Giraldo L., Camargo J. C., Dossman M. A., Echeverry M., Rodríguez J. A., Molina C., Molina E., Melo I. 2007. “Estimación de biomasa aérea y desarrollo de modelos alométricos para *Leucaena leucocephala* en sistemas silvopastoriles de alta densidad en el Valle del Cauca, Colombia”. Revista de comunicación técnica: Recursos Naturales y Ambiente, N° 58, p. 32-39. Colombia.

Baettig R., Yáñez M., Alborno M. 2010. “Cultivos dendroenergéticos de híbridos de álamo para la obtención de biocombustibles en Chile: estado del arte”. Revista Bosque Vol. 31(2): pp. 89-99. Chile.

Bateman I. y Lovett A. 2000. Estimating and valuing the carbon sequestered in softwood and hardwood trees, timber products and forest soils in Wales. Journal of Environmental Management Vol. 60, N° 4, Diciembre 2000, pp. 301-323

Blog Dirección de Producción Forestal. 2012. “Caracterización regional de Cuyo”. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Presidencia de la Nación. Disponible en <http://regioncuyoforestal.blogspot.com.ar/> Consultado: 10/02/2013

Bustamante J., Funes D., Clausen M., Barbeito M. 2010. “Biomasa Forestal como Fuente de Energía Renovable”. World Congress & Exhibition ENGINEERING 2010- ARGENTINA, 17-20 Octubre 2010, Buenos Aires.

Bustamante, J.; Pérez, S. 2006. “Comportamiento de clones de álamos en Barreal, San Juan, Argentina”. Revista FCA UNCuyo. Tomo XL, N° 1, Año 2008. pp. 73-77.

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”

Bustamante J., Pérez S., Llera J., Zanetti P., Funes D. 2009. "Cultivo de álamos en alta densidad: peso de biomasa al primer año". Jornadas de Salicáceas 2009. Mendoza, Argentina 15 al 17 de abril de 2009.

Bustamante J., Riu N., Calderón A., Pérez S., Settepani V. 2005. "Comportamiento de clones de *Populus sp.* en San Carlos, Mendoza". Actas 3º Congreso Forestal Argentino. Disertación ISSN 0329-1103, pp. 62- 63.

Calderón A. "Forestación con álamos para la obtención de madera de calidad". Facultad de Ciencias Agrarias, UNCuyo. Mendoza. Disponible en <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbnpbmZvcmlhY2lybmZvcmlvdGFsY3V5b3xneDo2MWJINjc2MTkzYjZOGlX> Publicado: s/f. Consultado: 14/05/2012

Capitanelli R. 1967. "Climatología de Mendoza". Ed. de la Facultad de Filosofía y Letras, Edición facsimilar 2005, Universidad Nacional Cuyo. 441 p.

Capitanelli R. 1972. "Geología, geomorfología, climatología, fitogeografía y zoografía de la provincia de Mendoza". Separata del suplemento Vol. XIII del Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica. Instituto de investigaciones de las zonas áridas y semiáridas. pp. 15-48

Castro I., Casado M., Ramirez-Sanz L., Manuel de Miguel J., Costa M. y Diaz Pineda F. 1996. "Funciones de estimación de la biomasa aérea de varias especies del matorral mediterráneo del centro de la península Ibérica". Revista Orsis año 1996, Vol. 11, p. 107-116

Chidiak M., Moreyra A., Greco C. 2003. "Captura de carbono y desarrollo forestal sustentable en la Patagonia Argentina: Sinergias y Desafíos". Centro de Investigación para la transformación. Universidad de San Andrés, Buenos Aires. Septiembre 2003. 136 p.

De la Cruz Calleja A. 2005. "Dinámica de nutrientes en parcelas experimentales de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier `I-214"`. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. 248 p.

Deraedt W. and Ceulemans R. 1998. "Clonal variability in biomass production and conversion efficiency of poplar during the establishment year of a short rotation coppice plantation". Revista Biomass and Bioenergy, Vol. 15, Nº 4/5, pp. 391-398. Belgium.

"Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza."

Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas. 2012. Datos de temperaturas medias anuales y de precipitación total anual. Disponible en <http://contingencias.mendoza.gov.ar/> Consultado: 07/05/2012

Díaz Balteiro L. 2002. "Influencia de políticas ambientales en la captura de carbono por parte de las masas forestales". Revista Economía Agraria y Recursos Naturales, ISSN: 1578-0732, Vol.2, 1 (2002); pp. 153-169. Madrid

Díaz Franco R., Acosta Mireles M., Carrillo Anzures F., Buendía Rodríguez E., Flores Ayala E., Etchevers J. 2007. "Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* schl. et cham". Revista Madera y Bosques, primavera, Año/Vol. 13, número 001. pp. 25-34. México.

Di Sbroiavacca N. 2008. "Necesidades y Desafíos Energéticos de la República Argentina". Jornada Regional sobre Energía, Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Fundación Bariloche. 17 de Octubre 2008, Mendoza, Argentina.

FAO. "Terminología unificada sobre bioenergía, TUB". Departamento Forestal de la FAO. 57 p. Disponible en <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/j6439s/j6439s00a.pdf> Publicado: 2004. Consultado: 10/03/2012

FAO. 2010. "Cap. 2 Extensión de los recursos forestales". En: FAO. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2010. Estudio FAO: Montes 163. Roma. ISSN 1020-4628. pp. 11-53

FAO. 2010. "What woodfuels can do to mitigate climate change". FAO Forestry Paper 162, ISSN 0258-6150. Roma.

Fasciolo G., Buccheri M., Gudiño M., Medalla Araya A., Papú O., Vitale J. 2010. "Futuro ambiental de Mendoza, Escenarios". Ed. EDIUNC. Universidad Nacional de Cuyo

Fenercom, Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. "Guía de la Cogeneración". España. Disponible en www.madrid.org Publicado 2010. Consultado: 11/06/2012

Fernández Linares L., Rojas Avelizapa N., Roldán Carrillo T., Ramírez Islas M., Zegarra Martínez H., Uribe Hernández R., Reyes Ávila R., Flores Hernández D., Arce Ortega J. 2006. "Manual de técnicas de análisis de suelos". México. ISBN 968-489-039-7. 184 p.

"Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon 'Conti 12', Perdriel, Mendoza."

Gasol C., Gabarrell X., Anton A., Rigola M., Carrasco J., Ciria P., Rieradevall J. 2009. "LCA of poplar bioenergy system compared with *Brassica carinata* energy crop and natural gas in regional scenario". Revista Biomass and Bioenergy Vol. 33, Issue 1, January 2009, pp. 119–129

IDITS (Instituto de Desarrollo Industrial, Tecnológico y de Servicios). 2005. "Estudio de la Industria en los departamentos de la Provincia de Mendoza". 212 p. Disponible en: http://www.idits.org.ar/Nuevo/Servicios/Publicaciones/Descargas/Inf_industria_por_departamento_Mza.pdf Consultado: 05/09/2013. Publicado: Junio del 2005.

INDEC. 1988. "Censo Nacional Agropecuario".

INDEC. 1991. "Censo Nacional de población y vivienda".

INDEC. 2001. "Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010". Resultados generales para la Provincia de Mendoza. Argentina. 66 p.

INDEC. 2010. "Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010". Argentina. 40 p.

Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias (IFPRI). 2006. "Enfoque de la Iniciativa Visión 2020 del IFPRI, Bioenergía y agricultura: promesas y retos". Editado por Peter Hazell y R. K. Pachauri, Enfoque 14. 28 p.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1996. "Directrices del IPCC para los inventarios de los gases de efecto invernadero, versión revisada en 1996". Vol. 2 Libro de trabajo y Vol. 3 Manual de referencia.

Jarsun R. 2008. "Manual de uso e interpretación de aguas". Secretaria de Ambiente, Córdoba, Argentina.

Laureysens I., Pellis A., Willems J., Ceulemans R. 2005. "Growth and production of a short rotation coppice culture of poplar. III. Second rotation results". Revista Biomass and Bioenergy, Vol. 29, Issue 1, pp. 10-21.

Ledesma M., Carranza C.A. y Balzarini M. 2010. "Estimación de la biomasa foliar de *Prosopis flexuosa* mediante relaciones alométricas". Revista Agriscientia, Vol. XXVII (2010), pp. 87-96

Leighton W. 1975. "Taxonomía de suelos. Un sistema básico de clasificación de suelos para hacer e interpretar reconocimientos de suelos. Soil Survey Staff". Versión abreviada en español de Soil Taxonomy. Ed. Agency for International Development for the Soil Management Support Services. 275 p.

Martí L., Salcedo C., Llera J., Valdés A. 2003. "Características físico-químicas y aptitud agronómica de aguas subterráneas, período 1997-2001 (Mendoza-Argentina)". Revista FCA, UNCuyo Tomo XXXV, N° 2, Año 2003, pp. 63-70

Martín F. Universidad Politécnica de Madrid, España. "Estudio de la productividad en biomasa de talleres de chopo a turnos muy cortos". Disponible en https://www.google.com.ar/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDUQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.agronoms.cat%2Fgrups-treball%2Fgrups%2Fdl%2Fgrup_13%2Fmod_doc%2Fentry_189%2Fchopos.pdf&ei=xhO2UbC9H8HN0gHfrICoBA&usq=AFQjCNF9ShSKLaO3bvoG1C6InUrOueC5A&sig2=QI0WmJuSbWFOoNWA6B4HwA. Publicado 2007. Consultado 19/02/2012

Martín F. y Núñez M. A. "Biomasa forestal: fuente energética". ETSI de Montes. Madrid. Disponible en <http://es.scribd.com/doc/53753911/Biomasa-Forestal-Fuente-Energetic-A> Publicado: 2006. Consultado: 26/03/2012

Méndez-González J., Luckie-Navarrete L., Capó-Arteaga M., Nájera-Luna J. 2011. "Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de Pinus devoniana lindl. y P. pseudostrobus lindl., en Guanajuato, México". Revista Agrociencia, Vol.45, N° 4 México: Mayo/Jun. 2011. pp. 479-491

Minoli R. 2012. "El Gobierno incluirá en la matriz energética nacional a la biomasa forestal". Revista ASORA, Julio-Agosto 2012, Año 17, N° 102, pp. 14-22

Moscatelli G. 1990. "Atlas de suelos de la República Argentina". Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Tomo II, pp. 75-104.

Municipalidad de Luján de Cuyo. "Mapa de la Provincia de Mendoza, del departamento de Luján de Cuyo y del distrito de Perdriel". Disponible en <http://www.lujandecuyo.gov.ar/> Consultado: 28/03/2012

Naciones Unidas. 1998. "Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático". 24 p. Disponible en <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>. Publicado 1998. Leído 05/03/2012.

"Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza."

Organización de la Naciones Unidas- Energía (ONU-Energía). “Bioenergía sostenible: un marco para la toma de decisiones”. Disponible en <http://www.eclac.org/cgi-bin/getProd.asp?xml=/publicaciones/sinsigla/xml/5/29835/P29835.xml&xsl=/tpl/p10f.xsl&base=/tpl/top-bottom.xsl>. Publicado 2007. Consultado 06/05/2011

Pacaldo R., Volk T. & Briggs R. 2012. “Greenhouse gas potentials of shrub willow biomass crops based on below- and aboveground biomass inventory along a 19-year Chronosequence”. Revista BioEnergy Research Vol. 6, Issue 1, pp. 252-262.

Panigatti L. 2010. “Argentina: 200 años, 200 suelos”. Ed. INTA, 2010. ISBN N° 978-987-1623-85-3. Buenos Aires. 361 p.

Pérez Valenzuela B.R. 1999. “Edafología en la agricultura regadía cuyana”. 1º ed. Mendoza: Editorial Fundar.

Regairaz M. “Suelos de Mendoza”. Centro Científico Tecnológico (CCT). Disponible en <http://www.cricyt.edu.ar/ladyot/catalogo/cdandes/cap06.htm#inhalt> Publicado: 2000. Consultado: 13/04/2012

Rodríguez Laguna R., Jiménez Pérez J., Aguirre Calderón O., Treviño Garza E. y Razo Zárate R. 2009. “Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la Reserva de la Biosfera el Cielo, Tamaulipas, México”. Revista Ra Ximhai, Año/Vol. 5, N° 3, pp. 317-327

Therburg A., Fasciolo G., Comellas E., Zuloaga J., Gudiño M. E., Rizzo P., Rojas F., Muñoz L., Balanza M. E. 2004. “Marco Estratégico para la Provincia de Mendoza, Diagnostico Físico Ambiental”. UNCuyo. Mendoza.

Torres E., Abraham E., Montaña E., Salomón M., Torres L., Urbina S. y Fusari M. 2003. “El agua en Iberoamérica; Aspectos de la problemática de las tierras secas”. Edit. Alicia Fernández Cirelli y Elena Abraham. Publicado por CYTED XVII. p. 17-34. IADIZA, Mendoza, Argentina.

Vande Walle I., Van Camp N., Van de Castele L., Verheyen K., Lemeur R. 2007. “Short-rotation forestry of birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) II. Energy production and CO₂ emission reduction potencial”. Revista Biomass and Bioenergy, Vol. 31, Issue 5, May 2007, pp. 276-283.

“Fijación y balance de dióxido de carbono y elaboración de función estimadora de biomasa en un cultivo energético de álamo clon `Conti 12`, Perdriel, Mendoza.”