

# Reduction of Carbon Footprint by means of *Chlorella sp.* cultures in photobioreactors

Rodrigo Arrué Zúñiga

Universidad de Santiago de Chile

[rodrigo.arruez@usach.cl](mailto:rodrigo.arruez@usach.cl)

**Abstract.** The high levels of greenhouse gases in the atmosphere and the changes caused on the environment make impresindible develop tools that improve the sustainability of human activities. The new greenvertising in several markets and growing environmental concern makes quite attractive to develop tools to reduce the environmental impact of business operations without reducing production level or quality. Microalgae's cultures are bloody efficient CO<sub>2</sub> sequestration. These crops when are performed into bioreactors, they greatly improves the culture conditions being controlled and more effective. Two types of companies were modeling by means of microalgal production: a vineyard and agribusiness enterprise where emissions were used by the companies for the 2012. Finally it takes 15 and 18 photobioreactors respectively, which was designed with a volumetric capacity of 13 [m<sup>3</sup>] with a proposal absorbing 80% of the contaminant load. Once stabilized the culture system, you can perform the audits to certify Carbon Footprint later to make branding strategies business.

**Keywords:** greenhouse gases, carbon footprint, microalgae, photobioreactor, sustainability.

## 1.- Problema

Desde la Revolución Industrial, la tendencia de crecimiento ha estado marcada por un acelerado desarrollo tecnológico de producción para las diferentes industrias y con ello su impacto ambiental inherente. Sin embargo, este impacto no ha sido mitigado de forma efectiva, generando pasivos ambientales, entendidos como los daños producidos por una empresa y que no han sido compensados al medio ambiente ni a la sociedad como el deterioro de los ecosistemas y el calentamiento global, provocado por el aumento de los gases de invernadero dentro de los cuales, el dióxido de carbono es el más abundante [1].

Durante las tres últimas décadas, la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) ha aumentado a una tasa de 1,6% por año y con el uso de combustibles fósiles, las emisiones de CO<sub>2</sub> han aumentado un 1,9% por año, las cuales se estiman sigan

aumentando. Los niveles de concentración de CO<sub>2</sub> han alcanzado cotas nunca antes registrada por sobre los 400 ppm en promedio a nivel mundial [2].

Ante este escenario mundial, la preocupación y la conciencia medioambiental es una de las tendencias que en muchos mercados, ya es una exigencia al momento de la producción y comercialización de bienes o servicios.

El problema de investigación identificado es la necesidad de reducir el impacto de las actividades humanas para mejorar el medioambiente de forma tal de asegurar un bienestar social a las futuras generaciones.

El Hombre como agente geográfico debe hacerse responsable de los pasivos ambientales generados directa o indirectamente por su intervención en el medio. Por ello el avance en herramientas que contribuyan a reducir los niveles de emisión de GEI pueden favorecer al

desarrollo y la calidad de vida de futuras generaciones.

La medición de la Huella de Carbono en empresas y productos ha sido de gran ayuda para poder conocer y poder controlar el impacto de las operaciones industriales sobre el medio ambiente.

Existen diversos métodos o medidas de mitigación que se pueden adoptar para poder reducir la emisión de GEI, como por ejemplo cambio de utilización de combustibles fósiles por energías renovables, sustitución de materias primas e insumos, cambio de hábitos, gestión de residuos y mejoras en logísticas, entre otras. Una de estas medidas de mitigación es la utilización de cultivos de micro algas para reducir la carga contaminante en fuentes de emisión directa.

Las microalgas son microorganismos eucariotas fotosintéticos capaces de transformar la energía lumínica en energía química con una eficiencia cuatro veces superior a las plantas [3].

Los cultivos de microalgas se pueden utilizar para reducir las emisiones de dióxido de carbono, ya que estas son microorganismos fotosintéticos que utilizan el dióxido de carbono como fuente para transformarlo en biomasa. Además, éstas tienen la habilidad de capturar hasta diez veces más CO<sub>2</sub> que las plantas [4].

La reducción de Huella de Carbono mediante cultivos de microalgas puede reducir la carga contaminante de las emisiones fijas de una empresa como un proceso externo a las actividades de ésta, sin alterar la calidad de sus procesos. Esto provisiona insumos aprovechables por la empresa, reduciendo su impacto negativo en el ambiente y generando beneficios para la empresa mediante la venta de bonos de carbono.

El propósito del proyecto en curso es mejorar la sustentabilidad de las actividades

productivas para poder contribuir con el cuidado al medioambiente, entregando una herramienta cuya utilización no ha sido insertada abiertamente al mercado como una solución para reducir la Huella de Carbono de productos y/o empresas.

## 2.- Objetivos

### - Objetivo General

El presente trabajo propone diseñar un modelo de reducción de Huella de Carbono mediante cultivos de microalgas para mejorar la sustentabilidad de las operaciones en las empresas.

### - Objetivos específicos

- I. Definir el tipo de fuente contaminante que se pretende reducir.
- II. Seleccionar la variedad de microalga más adecuada a las condiciones definidas.
- III. Elaborar el esquema de cultivo de microalga que permita reducir la carga contaminante propuesta.

## 3.- Estado del Arte

La Huella de Carbono se define como la medida del total de las emisiones de gases de efecto invernadero causadas de forma directa e indirecta por una actividad específica, o a través del ciclo de vida de determinado producto [5].

Existen dos tipos de emisiones: directas e indirectas. Las directas provienen de fuentes que son propiedad o controladas por la empresa. Las emisiones indirectas son aquellas que son consecuencia de las actividades de la empresa, pero ocurren en fuentes que son propiedad o están controladas por otra empresa [6].

Las fuentes de emisión directas como calderas chimeneas o reactores de fermentación para la industria vitivinícola

son las que se pueden intervenir mediante cultivos de microalgas, ya que poseen una emisión fija para poder instalar los fotobiorreactores para capturar el CO<sub>2</sub>.

La microalga *Chlorella sp.* es un alga verde de forma elipsoidal, la cual crece en forma de células simples y cuyas características principales se resumen en la Tabla 1. Pertenecen a la división *Chlorophyta* y a la clase de las *Chlorophyceae*. Se ha cultivado de forma intensiva con fines de alimentación y obtención de metabolitos.

Tabla 1: Algunas características de la microalga *Chlorella sp.*

<i>Chlorella sp.</i>	
Temperatura máx. tolerable (°C)	45
Concentración máx. de CO <sub>2</sub> tolerada % (v/v)	40
Tiempo duplicación (d)	2,34
Productividad volumétrica de biomasa (gL <sup>-1</sup> día)	0.02–2.5

Se puede realizar modelos matemáticos que simulen la producción de biomasa de una variedad de microalga a seleccionar. Se realizó un modelado de producción de la variedad *Chlorella sp.*, donde las variables independientes del estudio son el sustrato, luz y temperatura. Las dependientes son la concentración celular o biomasa y utilización de sustrato en un reactor discontinuo de mezcla perfecta.

- Sustrato: Se utiliza el modelo de Monod para simular la utilización del sustrato.

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S}$$

Donde

$\mu$ : tasa de crecimiento específica

$\mu_m$ : tasa máxima de crecimiento específica

S: concentración sustrato (CO<sub>2</sub>)

K<sub>s</sub>: constante de semi-saturación

- Temperatura: Se utiliza un modelo de función de limitación por temperatura

$$\mu(T) = \mu(20)\theta^{T-20}$$

Donde,

$\mu(T)$ = Función de temperatura (factor adimensional).

$\mu$  = Función de temperatura de referencia (la tasa de crecimiento específica se duplica al aumentar en 10°C).

$\theta$  = coeficiente de sensibilidad por especie. (en algas es de 1,066).

T: temperatura del medio.

- Luminosidad: Se utiliza el modelo de Steele.

$$\Phi_L = \frac{2.718f}{k_e H} \left( e^{\frac{2I_m}{\pi I_s} e^{-k_e H}} - e^{\frac{2I_m}{\pi I_s}} \right)$$

Donde

F: fotoperiodo.

H: altura.

I<sub>m</sub>: intensidad máx.

I: intensidad del medio.

K<sub>e</sub>: coeficiente de extinción.

El crecimiento de *Chlorella sp.* va a estar dado por la siguiente fórmula:

$$\mu = \mu_{\max}(S^* \Phi T^* \Phi I)$$

Los fotobiorreactores son sistemas de conducción cerrados, donde se tiene poco o ningún contacto con la atmósfera, en el cual, el cultivo circula en un complejo tubular, de tanque, de placa u otras diferentes formas que presentan claras diferencias respecto a los sistemas anteriores, ya que al no trabajar a cielo descubierto, las condiciones de cultivo son mayormente controladas como la temperatura, aireación, suministro de nutrientes, sedimentación, biopelículas, entre otras, haciendo al sistema mucho más productivo [7].

Existen diferentes tipos de fotobiorreactores respecto a su forma y diseño y a la finalidad que perciba este. Existen los de tipo carrusel utilizados para la producción de biomasa,

planos verticales e inclinados, tubular vertical y horizontal, triangulares, serpentín vertical y horizontal, airlift, iluminados internamente, de tanque agitado, etc... [8]. La utilización de uno u otro fotobiorreactor depende de la disponibilidad de luz, espacio, volumen y finalidad que perciba el cultivo.

Los tubulares horizontales tienen mejor captación lumínica pero requieren mayor espacio para su implementación y un motor para hacer recircular el cultivo. Los verticales o *airlift*, aprovechan el flujo de aire concentrado de CO<sub>2</sub> para su recirculación y dependiendo de la distancia de implementación entre cada uno, será su nivel de captación lumínica. Sin embargo, muchas veces se implementan sistemas de iluminación artificial para neutralizar dicha variable.

Los sistemas de cultivo microalgal son utilizados actualmente para la producción de biodiesel en algunos países como España, Alemania y Argentina, ya que estos no compiten con cultivos tradicionales como maíz, trigo o raps para producción alimentaria y no tiene un requerimiento tan alto de superficie como dichos cultivos.

Los cultivos de microalgas también son utilizados para producir algunos compuestos que sintetizan estos microorganismos como terpenos, beta carotenoides, provitamina A entre otros concentrados para la producción de fármacos [9]. Sin embargo, la utilización de microalgas para la captación de dióxido de carbono no ha sido ampliamente desarrollada y cuya función puede ser contribuir fuertemente a mejorar los impactos ambientales de las actividades industriales.

#### 4.- Método

El proyecto comienza identificando las fuentes contaminantes a intervenir y el tipo de empresas a las cuales se va a enfocar el servicio de reducción.

Los segmentos a abordar como clientes son principalmente la industria vitivinícola y las agroindustrias en general, donde las viñas, las fuentes fijas de emisión corresponden a las calderas de fermentación del mosto, donde se generan emisiones de dióxido de carbono. La agroindustria es el segundo segmento abarcando empresas de producción de alimentos como jugos, mermeladas, salsas, entre otras.

Una vez conocida la carga contaminante y el caudal de la emisión, se puede realizar el modelado de reducción para conocer el volumen del cultivo de microalga que se requiere para consumir dicha carga, que tipo de fotobiorreactor y cuantos se deben utilizar e implementarlos en la empresa.

Posterior a la implementación de los fotobiorreactores, se debe evaluar y controlar el funcionamiento del sistema, realizar las cosechas de microalgas y gestionar los insumos generados en la producción de biomasa.

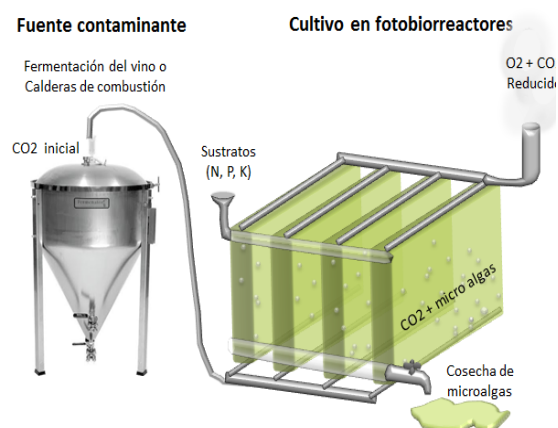


Figura 1: Proceso de producción de microalgas y reducción de carga contaminante.

Después de varios ciclos productivos, se puede estabilizar el sistema de forma tal de presentar la auditoría para determinar el nivel de reducción de Huella de Carbono alcanzado.

## 5.- Resultados

### - Tipo de fuente contaminante

Se identificó una fuente fija de emisión contaminante para cada uno de los segmentos a abarcar como clientes. Para la industria vitivinícola se empleó las emisiones de la viña Cantera del año 2012, donde se observó una carga contaminante de 16,7 ton de CO<sub>2</sub> al mes y para una empresa agroindustrial, su carga contaminante es de unos 12,7 ton CO<sub>2</sub> al mes. Sin embargo, para esta última, el caudal es de unos 10 m<sup>3</sup>/mes más que para la viña.

### - Selección de variedad de microalga

Para determinar que variedad de microalgas es más adecuada para la captación de CO<sub>2</sub>, se realizó una selección respecto a cuatro factores que inciden en esta variable:

- Productividad volumétrica de biomasa (g/L-1 día).
- Tolerancia a la temperatura (°C).
- Tolerancia al CO<sub>2</sub> (%).
- Tiempos de duplicación (días).

Estos factores fueron ponderados de formas equitativas (25% cada uno) y para cada variedad se utilizó una escala Likert de 0 a 10; donde cero es nulo, 2 deficiente, 4 malo, 6 regular, 8 bueno y 10 es eficiente.

Los niveles máximos tolerados de temperatura para cada microalga será un factor a considerar, ya que el fotobiorreactor se encontrará en la intemperie, por lo que se compararon las temperaturas correspondientes a los meses Enero-Febrero del año 2013, con los niveles máximos de tolerancia para cada variedad y los niveles óptimos para poder evaluarlos.

La temperatura más adecuada se estableció respecto a las temperaturas promedio registradas en el periodo en la región metropolitana, Chile.

De esta forma, la temperatura máxima registrada es de 34,6°C, para asegurarse que no se experimenten problemas en el cultivo, se evaluó respecto a la temperatura máxima tolerable para cada variedad y se ponderó respecto a dicho criterio.

Tabla Selección de variedad de microalga (screening) más adecuada para la producción mediante un método de factor ponderado.

Especie microalga	Biomasa 25%			Temperatura 25%			Tolerancia a un alto [CO <sub>2</sub> ] 25%			Tiempo de duplicación (d) 25%			Total Score
	(g/L-1 d)	Ratings	Score	°C	Ratings	Score	%v/v	Ratings	Score	Días	Ratings	Score	
Scenedesmus sp.	0,74	2	0,5	30	0	0	80	8	2	3,41	4	1	3,5
Chlorococcum sp.	0,28	2	0,5	60	0	0	70	8	2	1,67	8	2	4,5
Synechococcus sp.	0,74	2	0,5	60	8	2	60	6	1,5	4,33	2	0,5	4,5
Euglena sp.	7,70	8	2	34	0	0	45	6	1,5	1,4	10	2,5	6
Chlorella sp.	7,70	8	2	45	6	1,5	40	6	1,5	2,34	6	1,5	6,5
Dunaliella sp.	0,34	2	0,5	40	6	1,5	15	2	0,5	1,38	10	2,5	5
Chlamydomonas sp.	0	0	0	35	2	0,5	15	2	0,5	2,37	6	1,5	2,5
Nannochloris sp.	1,43	2	0,5	25	0	0	15	2	0,5	0	0	0	1
Tetraselmis sp.	0,32	2	0,5	35	4	1	14	2	0,5	1,93	8	2	4
Monoraphidium sp.	0	0	0	25	0	0	13,6	2	0,5	0	0	0	0,5
Spirulina sp.	4,3	6	1,5	38	4	1	12	2	0,5	2,16	6	1,5	4,5

Respecto al método de factor ponderado, la variedad de microalga que posee mayor puntaje es *Chorella sp.* con 6,5 puntos, por lo que esta variedad es la que se utilizó para el modelado de la producción.

### - Esquema de cultivo de microalga

Para el modelado de crecimiento microbiano, se utilizaron coeficientes cinéticos utilizados en estaciones de depuración de aguas residuales (EDAR) como las constantes de utilización de sustrato para la especie *Chorella sp.*, constante de decrecimiento y la tasa de crecimiento específica.

Tabla 3: Modelado de producción de microalgas y fotobiorreactores a utilizar.

Concepto	Segmentos	
	Viñas	Agroindustria
Carga (kg CO <sub>2</sub> /mes)	16783,25	12750
Caudal (m <sup>3</sup> /mes)	40	50
Carga a reducir (80%)	13426,6	10200
Carga final (Kg CO <sub>2</sub> /mes)	3356,65	2550
Volumen planta (m <sup>3</sup> )	196,7102279	245,5380117
Área total (há)	0,009835511	0,012276901
Cantidad de tubos FBR	74,1001939	92,49348378
Cantidad FBR	15	18

Para la viña, se necesitan 15 fotobiorreactores los cuales se deben implementar en una superficie de 0,01 hectáreas.

Para la empresa agroindustrial, se deben utilizar 18 fotobiorreactores utilizando prácticamente la misma superficie. Cabe mencionar que se puso como meta reducir hasta el 80% de la carga contaminante para ambos casos.

Tabla 4: Diseño fotobiorreactor estándar.

Dimensión FBR estándar	
Altura (m)	2,00
R interno (m)	0,65
Área (m <sup>2</sup> )	1,33
Volumen (m <sup>3</sup> )	2,65
Cantidad de tubos por FBR	5
Volumen FBR (m <sup>3</sup> )	13,27

El fotobiorreactor utilizado en el diseño es uno tubular vertical de unos 2 metros de altura, 65 cm de grosor y con un volumen interno de 13,3 m<sup>3</sup>, donde cada fotobiorreactor posee 5 tubos verticales.

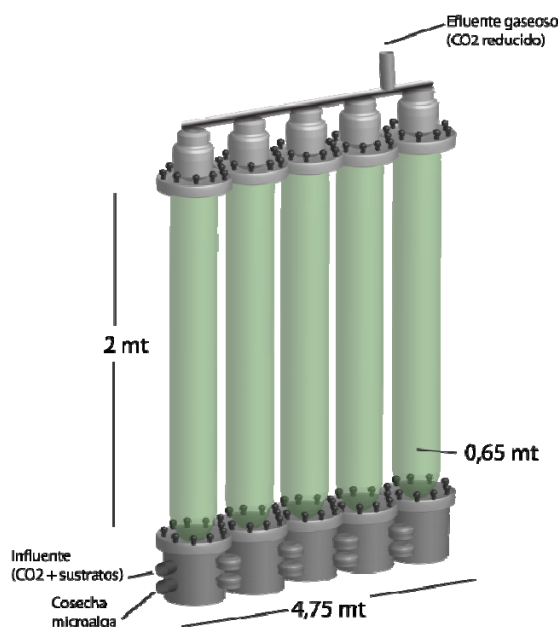


Figura 2. Diseño de fotobiorreactor estándar para reducción de carga contaminante.

Se seleccionó este tipo de fotobiorreactor, ya que optimiza el espacio de implementación al utilizar menor superficie que los horizontales, sin embargo, estos poseen menos captación lumínica, por lo que en muchos casos, es recomendable implementar un sistema de iluminación artificial. Estos deben ir colocados en disposición oriente-poniente para aprovechar la trayectoria solar y obtener mayor captación lumínica.





Figura 3. Simulación de implantación de los FBR's en la planta vitivinícola.

Como se observa en la Figura 3, los 15 fotobiorreactores requeridos para consumir los 16.783 Kg CO<sub>2</sub> al mes ocupan una superficie bastante pequeña (98,35 m<sup>2</sup>) y se conectan mediante un sistema de conducción externo alimentado de los canales de ventilación de los reactores de fermentación o calderas de combustión para empresas agroindustriales.

Una vez realizado el ciclo productivo de la microalga, esta debe ser cosechada y dejar un 30% del cultivo para que se regenere nuevamente. Se generarán 137,2 m<sup>3</sup> de biomasa para el caso de la viña y 171,8 m<sup>3</sup> para la empresa agroindustrial de forma mensual los cuales se pueden convertir tras procesos de centrifugado y procesos de extracción lipídica mediante químicos o algunas técnicas de ultrasonido o con acción enzimática, los aceites de esta masa, generando una masa seca la cual se puede utilizar como fertilizante o alimento animal.

Los aceites extraídos pueden transformarse mediante procesos de transesterificación en biodiesel y bioetanol, generándose además glicerina. Todos estos elementos son de alto atractivo comercial, lo cual se puede aprovechar para percibir retornos de divisas y hacer más sustentable el proceso productivo.

## 6.- Conclusiones Generales

El Hombre al intervenir el medio para su desarrollo, debe asegurar que estas actividades sean adecuadas para el bienestar medioambiental el cual a su vez influye en el desarrollo de las sociedades.

El Calentamiento Global es una consecuencia de estas intervenciones, cuyos niveles actuales son críticos, por lo tanto, si no se adoptan medidas correctoras y preventivas para mejorar dicha situación, se puede poner en riesgo las condiciones de vida de las personas.

Este sistema de reducción propuesto contribuye a combatir los pasivos ambientales generados por las industrias, mejorando la calidad del aire y cuyo impacto ambiental es prácticamente nulo, ya que se pueden aprovechar todos los residuos generados en la actividad.

Los cultivos de microalgas se pueden utilizar en diferentes zonas geográficas y con diversas condiciones medioambientales, ya que al utilizar fotobiorreactores, estos permiten controlar de forma más efectiva las variables independientes de producción, además de utilizar mucho menos espacio que sistemas de producción abiertos, donde para este caso se utilizan 98,35 m<sup>2</sup> y 122 m<sup>2</sup> para los dos tipos de empresa, reduciendo el 80% de la concentración de CO<sub>2</sub> inicial.

Los cultivos de microalgas poseen un gran potencial de absorción de dióxido de carbono, sin utilizar necesariamente suelos de uso agrícola y son mucho más eficientes en la captación que las plantas.

El reducir la Huella de Carbono permite a las empresas mejorar su competitividad, desarrollar de mejor manera su marca (branding) y ser mucho más sustentables en sus operaciones, además de presentar beneficios para la empresa al generar ingresos secundarios mediante la venta de bonos de carbono y el aprovechamiento de

residuos de producción de bastante atractivo comercial.

Puede servir para algunas empresas como ayuda para entrar a algunos mercados como Reino Unido y países de la Unión Europea, donde los bajos niveles de Huella de Carbono en sus productos y/o procesos son ya una barrera de entrada para esos mercados.

Se recomienda validar este modelo teórico mediante la implementación de este modelo en alguna empresa y realizar un estudio económico-financiero para determinar el nivel de rentabilidad real que posee.

En la actualidad existen empresas que poseen cuantificada su Huella de Carbono y desean reducirla para ser competitivas en un mercado cuya exigencia y compromiso medioambiental es alto, sin ver limitados sus niveles productivos, por lo que este modelo se presenta como solución económica y ambientalmente compatible.

## Referencias

[1] WMO, "Las Concentraciones de Gases de Efecto Invernadero alcanzan un nuevo récord", comunicado N°965, 2011, Ginebra.

[2] IPCC, "Climate Change: Mitigation of Climate Change", 2007, New York, páginas 99-102.

[3] E. Becker, "Microalgae: Biotechnology and microbiology". 1995, New York, 1ª edición, páginas 04-103.

[4] FIA, "Huella de carbono en productos de exportación agropecuarios de Chile", 2010, Chile, páginas 07-10.

[5] CONAMA, "Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes", 2009, Chile, páginas 18-115.

[6] Sociedad española de Ficología, "Algas", 2006, España, Editorial J. Eduardo Linares, páginas 04-06.

[7] Otto Pulz y Wolfgang Gross, "Valuable products from biotechnology of microalgae", Applied Microbiology biotechnology, volumen 97, 2004, ISSN: 0175-7598.

[8] Kanhaiya Kumar, Chitralakha Nag Dasgupta, Bikram Nayak, Peter Lindblad y Debabrata Das, "Development of suitable photobioreactors for CO2 sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria", Bioresource Technology, volumen 102, 2011, ISSN: 4945-4953.

## Glosario

GEI: Gases de efecto invernadero.

GHG: Greenhouse gases.

Branding: Proceso de hacer y construir una marca.

Eucariota: Células con núcleo definido donde contienen el material genético.

Fotobiorreactor (FBR): Sistemas de cultivos cerrados de microorganismos.

Greenvertising: Estrategias de comunicación y publicidad verdes y medioambientales.

Huella de Carbono: Es la medida del impacto que provocan las actividades del ser humano en el medio ambiente y se determina según la cantidad de emisiones de GEI producidos, medidos en unidades de dióxido de carbono equivalente.

Pasivo ambiental: Suma de daños no compensados producidos por una empresa al medio ambiente.

Transesterificación: Proceso químico a través del cual aceites se combina con alcohol (etanol o metanol) para generar una



reacción que produce ésteres grasos como el etil o metilo éster.

### **Autor principal**

Rodrigo Ignacio Arrué Zúñiga, Ingeniero en Agronegocios de la Universidad de Santiago de Chile, con estudios parciales en Ciencias ambientales en la Universidad de Granada, España. Sus principales líneas de investigación incluyen las siguientes áreas: Ingeniería ambiental, gestión integrada de residuos, sistemas de gestión de calidad y conocimientos en robótica.

---

### **Paper Info**

Fecha de recepción: 2013.  
Fecha de aceptación: 2013.  
Cantidad de revisores: 3.  
Cantidad de revisiones consolidadas: 3.  
Total de observaciones: 10.  
Índice de Novedad: 0,53.  
Índice de Utilidad: 0,70.