

ESTUDI DE PRODUCCIÓ ENERGÈTICA AMB MICROALGUES

LA REUTILITZACIÓ DE CO₂ D'INCINERADORA I D'AIGÜES DE DEPURADORA



Miquel Àngel Bauza i Riera
Marc Compte i Rovirola
David Bota i Crespo

Juliol 2009

Aiga 

JESÚS COLPRIM I GALCERAN i EMILI MATÓ PALOS, professors de la Facultat de Ciències de la Universitat de Girona

CERTIFIQUEN

Que els estudiants Miquel Àngel Bauza i Riera, Marc Compte i Rovirola i David Bota i Crespo han dut a terme, sota la seva direcció, l'estudi titulat *Estudi de producció energètica amb microalgues. La reutilització de CO₂ d'incineradora i d'aigües de depuradora*, i presenten aquesta memòria, la qual constitueix el projecte final de carrera per optar a la Llicenciatura de Ciències Ambientals.

Girona, 31 de Juliol de 2009

Jesús Colprim i Galceran
(Tutor tècnic)

Emili Mató i Palos
(Tutor docent)

ÍNDEX DE CONTINGUTS

1.	PREÀMBUL	5
2.	AGRAÏMENTS	6
3.	JUSTIFICACIÓ	7
4.	ANTECEDENTS	9
5.	OBJECTIUS	12
6.	INTRODUCCIÓ	13
6.1.	El Gironès: Situació geogràfica i socioeconòmica	15
6.1.1.	Girona	19
6.1.2.	Salt	21
6.1.3.	Sarrià de Ter	25
6.2.	La incineradora	28
6.2.1.	Emissions de la incineradora	32
6.2.2.	Evolució incineradora	33
6.2.3.	Descripció del procés d'incineració	35
6.3.	Emissions de gasos a Girona	39
6.4.	Residus sòlids urbans a Girona i Catalunya	40
6.5.	La depuradora i les aigües residuals	45
6.5.1.	Xarxa de clavegueram i col·lectors	45
6.5.1.1.	Organismes competents	46
6.5.1.2.	Xarxa de clavegueram i col·lectors	47
6.5.1.3.	Problemàtiques detectades	47
6.5.2.	Producció d'aigües residuals	48
6.5.3.	Sistemes de sanejament i depuració	49
6.5.3.1.	EDAR de Campdorà	49
6.5.3.2.	Explotació de la planta depuradora	50
6.5.4.	Qualitat de les aigües	51
6.5.4.1.	Reutilització de les aigües i fangs	54
7.	METODOLOGIA	55
7.1.	Esquema i descripció general del sistema	55
7.2.	Les microalgues	56
7.2.1.	La tecnologia de les microalgues	63
7.2.2.	<i>Chlorella</i> sp.	65
7.2.2.1.	Composició de la <i>Chlorella</i> sp.	66
7.2.2.2.	Reacció de fotosíntesi de la <i>Chlorella</i> sp.	67
7.2.3.	Eliminació dels nutrients de les aigües	68
7.2.3.1.	Nutrició de les microalgues	68
7.2.3.2.	Eliminació del fòsfor en cultius d'algues	69
7.2.3.3.	Eliminació del nitrogen en cultius d'algues	71
7.2.4.	Acumulació de lípids per limitació de nutrients	72
7.2.5.	La recuperació de les microalgues	74
7.3.	Producció d'energia	77
7.4.	Aplicacions en l'alimentació	83
7.5.	Sistemes de cultiu	88
7.5.1.	Comparació reactor tubular – sistemes oberts	92

7.5.2.	El fotobiorreactor tubular	94
7.5.2.1.	L'estructura del reactor	94
7.5.2.2.	Els gasos en el reactor	94
7.5.2.3.	La temperatura en el reactor	96
7.5.2.4.	La llum en el reactor	96
7.5.2.5.	La dinàmica del fluid	97
7.6.	Càlcul de la radiació solar	99
7.7.	Càlcul del creixement de l'alga	108
8.	DISSENY DE LA PLANTA	109
8.1.	Plantejament	109
8.2.	Diagrama de procés	112
8.2.1.	Esquema del procés	112
8.2.2.	Unitats de procés	113
8.2.2.1.	Absorbidor	113
8.2.2.2.	Fotobiorreactor	116
8.2.2.3.	Decantador	126
8.2.2.4.	Centrífuga de deshidratació	128
8.3.	Balanç de matèria	131
8.3.1.	Balanç de matèria global	133
8.3.2.	Simulacions del balanç global	135
8.3.3.	Balanç de matèria unitari	137
8.4.	Balanç d'energia	140
8.4.1.	Identificació dels guanys	140
8.4.2.	Identificació de pèrdues	141
9.	DIAGNOSI. ANÀLISI I DISCUSSIÓ DE DADES	148
10.	CONCLUSIONS	150
11.	GLOSSARI	153
12.	BIBLIOGRAFIA	155
13.	ANNEXES	159

1. PREÀMBUL

El nostre grup format per **David Bota i Crespo, Miquel Àngel Bauza i Riera, i Marc Compte i Rovirola**; cursem l'últim curs de la Llicenciatura de Ciències Ambientals. Dins l'assignatura *Projecte*, presentem el projecte titulat *Estudi de producció energètica amb microalgues. La reutilització de CO₂ d'incineradora i d'aigües de depuradora*.

El motiu per realitzar aquest projecte va ser una proposta del **Dr. Miquel Rigola i Lapeña**. Posteriorment va assumir la tutela del projecte el **Dr. Jesús Colprim i Galceran**.

La recerca d'informació per una tècnica innovadora i no molt estudiada fins al moment en el nostre país, ens va motivar a tirar endavant el projecte. L'ajuda del tutor ha estat fonamental per a realitzar un projecte on la manca de manuals o sistemes preexistents han constituït un problema. Al mateix temps però, ha estat un repte que hem pogut superar per a desenvolupar un procés "ideal", a partir del qual es podrà acotar i desenvolupar en un futur.

Com ja s'ha dit, el nostre tutor tècnic ha estat el **Dr. Jesús Colprim i Galceran**, i com a tutor docent el **Sr. Emili Mató i Palos**.

2. AGRAÏMENTS

Els nostres agraïments van dirigits en primer terme al nostre tutor tècnic de projecte, el **Dr. Jesús Colprim i Galceran**, per la seva tutela, suport i orientació que ens han ajudat setmana rere setmana per a la realització del projecte.

D'igual forma, també agrair al **Sr. Emili Mató i Palos** per la seva vinculació com a tutor docent.

També volem mostrar el nostre agraïment i reconeixement a totes aquelles persones que de forma voluntària han col·laborat en l'elaboració d'aquest estudi.

Agraïments a:

- **Sra. Gabriela Poch**, Directora de la EDAR de Campdorà, i a la resta de treballadors per la seva col·laboració i paciència.
- **Sr. Jordi Bardají i Viaplana**, Director Tècnic de la incineradora de Campdorà.

Gràcies a tots!

3. JUSTIFICACIÓ

Es pretén adquirir la tècnica per **aprofitar els nutrients sortints de la depuració d'aigües convencionals, així com donar un segon ús al CO₂ per tal de fer créixer microalgues, i utilitzar la biomassa resultant produïda com a combustible.** Aquest sistema complementari a la depuració d'aigües residuals és un sistema innovador en el nostre territori.

En cas que es superés la diagnosi de requeriments, el nou sistema seria un complement perfecte per a la depuració convencional actual, proporcionant un tractament terciari a les aigües. Augmentant així la qualitat de l'aigua final.

L'altre aspecte important, és l'aprofitament d'energia dins del propi sistema. **La biomassa que es produeix, composta per microalgues, pot ser aprofitada per generar energia.** Així es redueix la necessitat d'importar energia des de fora de la pròpia planta, reduint-ne els costos de funcionament i utilitzar l'excedent final per incorporar-lo a la xarxa elèctrica convencional.

A partir d'aquesta biomassa produïda, s'obren expectatives pel seu ús, que a banda de l'aprofitament energètic, poden ser:

- Fertilitzants.
- Manteniment de l'estructura del sòl.
- Consolidació del sòl en contra de l'erosió.
- Substàncies reguladores en el creixement de les plantes.
- Producció de substàncies farmacèutiques.
- Ingredient proteic per menjar animal.

Font: Grönlund E.; *Microalgae at wastewater treatment in cold climate*. Luea University of Technology (2002).

La següent taula mostra algunes categories de substàncies, normalment presents a l'aigua. Quan aquestes són introduïdes a l'ecosistema per les activitats humanes en quantitats molt superiors a les concentracions naturals, esdevenen contaminants.

Grup de substàncies	Exemples	Possible efecte en el medi ambient
Components orgànics	* Productes naturals de metabolisme (components carbonatats) * Components orgànics antropogènics (pesticides, herbicides, etc)	* Esgotament oxigen * Toxicitat crònica * Toxicitat aguda, bioacumulació
Components inorgànics	* Nutrients (nitrat, fosfat, etc) * Elements traces i metalls pesats (Cu, Zn, Pb, Ca, etc)	* Efectes fertilitzants * Toxicitat, bioacumulació
Partícules (> 0.45 µm)	* Fusta, sorra, metall, plàstic, etc	* Interferències físiques
Microorganismes	* Patògens * <i>E. coli</i>	* Precursors de malalties
Gasos dissolts	* O ₂ , CO ₂ , NH ₃ , CH ₄	* Efectes fertilitzants, toxicitat

Font: Ranka Junge – Berberovic. *Possibilities and limits of wastewater-fed aquaculture*. (2001)

Pràcticament qualsevol tipus de contaminació a l'aigua pot ser tractada a posteriori. El principal inconvenient en el tractament d'aigües residuals és que la contaminació és només transferida a un altre compartiment on és menys molesta o més fàcil de tractar. Així doncs, la primera prioritat en la protecció del medi ambient ha de ser una reducció de la contaminació en origen, encara que mai es podrà arribar a una contaminació zero.

Pel què fa al tractament d'aigües residuals, normalment consisteix en un pretractament mecànic, seguit de tractaments amb fangs actius i els seus post - tractaments.

La principal millora que suposa la depuració complementària a la EDAR, per mitjà de microalgues, és el reciclatge dels nutrients en biomassa aprofitable. Alhora que també s'incorpora el CO₂ a l'estructura de les microalgues.

4. ANTECEDENTS

Estudis sobre el tractament d'aigües residuals i CO₂ mitjançant microalgues:

Any: 1986.

Títol: *Depuración integral con recuperación de nutrientes mediante tratamiento terciario fotosintético con microalgas.*

Autor: Velasco.

Any: 1989.

Títol: *Dinámica temporal de las microalgas de un tratamiento terciario de aguas residuales urbanas a escala de laboratorio.*

Autors: Miguel Álvarez Cobelas i Tomás Gallardo.

Organisme: Universidad Complutense de Madrid.

Any: 2007 – actualitat (en curs).

Títol: *Tratamiento terciario de aguas residuales urbanas e industriales mediante microalgas.*

Autora: Eugenia Martínez Sancho.

Organisme: Universidad de Granada.

Any: 2008 – actualitat (en curs).

Títol: *Desarrollo de un sistema integrado para tratamiento terciario de aguas residuales urbanas y producción de hidrocarburos mediante la microalga Botryococcus.*

Autor: Sebastián Sánchez Villasclaras.

Organisme: Universidad de Jaén.

Any: Finalització 2011.

Títol: *Producción y valorización de biomasa a partir de microalgas.*

Autor: Jesús Forja Pajares.

Organisme: Universidad de Cádiz.

Any: 1998.

Títol: *A look back at the U.S. Department of Energy's Aquatic species Program-Biodiesel from algae*

Autors: Sheehan J., Dunahay T., Beneman J., Roessler P.

Organisme: The National Renewable Energy Laboratory.

Planta en funcionament a Espanya:

Localització: Jaén.

Dimensió: Planta de 70 m².

Projecte en execució:

Localització: Cadis.

Descripció: Planta de tractament d'una fàbrica productora de ciment que preveu reduir les emissions de 350.000 T de CO₂/any. El projecte el porta a terme l'empresa *Celulosa investment*, filial del grup Aurantia.

Holcim i Aurantia van començar a mitjans de 2008 la realització de proves fora de laboratori de la viabilitat i capacitat d'absorció de CO₂, provinent de la fàbrica de ciment de Jerez de la Frontera (Cadis), per part de les microalgues destinades a l'obtenció de biodiesel.

Es tracta d'una prova pilot pel cultiu de microalgues (en aquest cas van utilitzar *Botryococcus braunii*) que utilitza el CO₂ de la planta de ciment, els resultats de la qual determinaran el futur i la viabilitat del projecte.



Fàbrica de ciment a Jerez de la Frontera

D'aquesta manera, s'està avaluant la idoneïtat de les emissions de la fàbrica per aquest cultiu, a més de seleccionar la varietat de microalga més adequada per acceptar aquesta alimentació. Després d'això, es realitzarà un estudi de viabilitat a escala industrial per a la seva posada en marxa.

Les instal·lacions es situaran al Golf de Cadis i es preveu que produeixi un total de 20.000 tones d'aquest carburant ecològic cada any.

El centre, que requereix una inversió de 48 milions d'euros, es basa en el tractament i la transesterificació no només de cultiu de microalgues, sinó també de soja, colze o gira-sol.

Resum històric:

De manera general, podem dir que fins als anys vuitanta, la recerca estava centrada al nivell biològic de les microalgues. A partir de llavors, i coincidint amb l'inici d'una percepció d'una problemàtica ambiental global, es comencen a fer els primers estudis de viabilitat de les microalgues com a biodepuradores. No obstant, és a partir del 2000 en endavant, i en concret a Espanya durant aquests últims dos anys, que s'ha avançat molt en aquest estudi.

Actualment, estan sorgint empreses que ja estan duent a terme algunes instal·lacions. A nivell internacional hi ha un gran interès, segurament induït per l'escalada de preus del petroli i l'auge dels biocombustibles.

S'ha de dir que molts estudis van enfocats només a la fixació de CO₂ per indústries contaminants en aquest sentit.

5. OBJECTIUS

Aquest nou sistema requereix d'un estudi previ per avaluar de quina manera s'ha d'implantar en el nostre territori.

Objectius generals:

- Obtenir energia a partir de la biomassa de microalgues.
- Investigar els mètodes de cultiu de microalgues i les seves diferents tècniques.
- Crear un model de planta per tal d'optimitzar el procés.

Objectius concrets, el cas de Girona:

- Mantenir, i si és possible augmentar, la qualitat de l'aigua de sortida de la planta depuradora d'aigües residuals.
- Reduir la quantitat de nutrients (amoni i fòsfor) de l'aigua provinent de la depuradora de Campdorà.
- Reduir les emissions de CO₂ directament a l'atmosfera, provinents de la incineradora de Campdorà.
- Estudiar la viabilitat del procés d'eliminació de nutrients (nitrogen amoniacal i fòsfor) de l'efluent de la EDAR de Campdorà, i de diòxid de carboni de les emissions de la incineradora de Campdorà mitjançant microalgues.
- Aprofitar l'energia generada a partir de la biomassa i reutilitzar-la dins la mateixa planta, per altres fases del procés o pel manteniment i funcionament de la instal·lació, i introduir l'excedent a la xarxa elèctrica convencional.

6. INTRODUCCIÓ

L'escalfament global causat per les emissions creixents de gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera és una preocupació de la societat actual. El diòxid de carboni (CO₂) és el principal gas d'efecte hivernacle i la seva concentració s'ha vist incrementada ininterrompudament des de la industrialització fins als nostres dies.



Al 1997, 7.4 bilions de tones de CO₂ van ser alliberades a l'atmosfera provinents de fonts antropogèniques; a l'any 2100 s'estima que puguin arribar a ser 26 bilions de tones. Durant les dues últimes dècades, s'han produït molts intents per reduir el CO₂ atmosfèric, per exemple mitjançant l'ús de fonts d'energia renovables o per la fixació terrestre del carboni.

Aquí intervé el Protocol de Kyoto, que és el conveni internacional per la prevenció del canvi climàtic emprés per l'ONU dins de la Convenció Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic (CMNUCC), el qual fou ratificat el 2002 per la Unió Europea i obliga a tots els seus països al seu compliment.

L'objectiu principal és lluitar contra els efectes del canvi climàtic i l'escalfament global. Per fer-ho, s'ha establert una reducció de les emissions pels països industrialitzats.

Les emissions de CO₂ provinents de fonts d'energia renovables no es veuen sotmeses al Protocol de Kyoto. Així doncs, l'emissió de CO₂ de combustibles provinents de microalgues, que prèviament sortien de la incineradora, no es troba sotmès al Protocol de Kyoto.

Un dels mètodes menys estudiats és la reducció del CO₂ amb l'ús de microalgues, que el transformen a biomassa. **Les microalgues usen el CO₂ eficientment ja que poden créixer ràpidament i poden ser incorporades en sistemes com els fotobiorreactors.**

Es pretén implantar doncs, com un mètode complementari a les depuradores convencionals, per tal d'oferir la màxima qualitat en la depuració de les aigües.

Es tracta de potenciar, regular i oferir les millors condicions a aquestes microalgues per tal que puguin disminuir la quantitat de nitrogen i fòsfor de les aigües de sortida de la EDAR, millorant la qualitat de l'aigua abans de tornar a ser alliberada al medi. Al mateix temps que disminueix la quantitat de CO₂ que se li aplica provinent de la incineradora.

Una planta de combustió de carbó típica emet fluids gasosos que contenen aproximadament un 13% de CO₂. Aquesta alta concentració pot ser reconvertida, mitjançant un cultiu de microalgues, en un útil combustible o per la generació energètica.

En els darrers anys, hi ha hagut un interès creixent per les tecnologies de mitigació dels gasos d'efecte hivernacle. Com a conseqüència, s'ha produït un interès renovat en el cultiu de masses de microalgues i producció de combustibles i energia a partir de la utilització del CO₂. No és un concepte nou, doncs Oswald i Golueke (1960) ja havien estudiat el potencial d'aquestes tècniques per reduir i evitar les emissions de CO₂, i així reduir el perill global mundial.

Les microalgues tenen un atribut únic: **poden utilitzar CO₂ concentrat pel creixement, superiors als nivells de CO₂ en l'aire que utilitzen les plantes superiors.** Això pot permetre el cultiu de microalgues en llocs amb emissió de gasos; probablement l'únic mètode per usar directament fonts de CO₂.

El CO₂ es torna a alliberar una vegada la biomassa és utilitzada com a combustible, tot i això, una quantitat equivalent de combustible fòssil no és cremada i no s'allibera la quantitat corresponent de CO₂ del fòssil a l'atmosfera, i per tant, es redueix el total d'emissions de CO₂. És a dir, al donar un nou ús al CO₂ estalvia la part corresponent d'explotació de combustibles fòssils.

No es tracta d'un mètode que es pugui implantar a Catalunya de manera impulsiva i ràpida, sinó que requereix d'un estudi de viabilitat, ja que s'ha de determinar com poden influir aspectes com la latitud, el clima i la radiació solar incident.

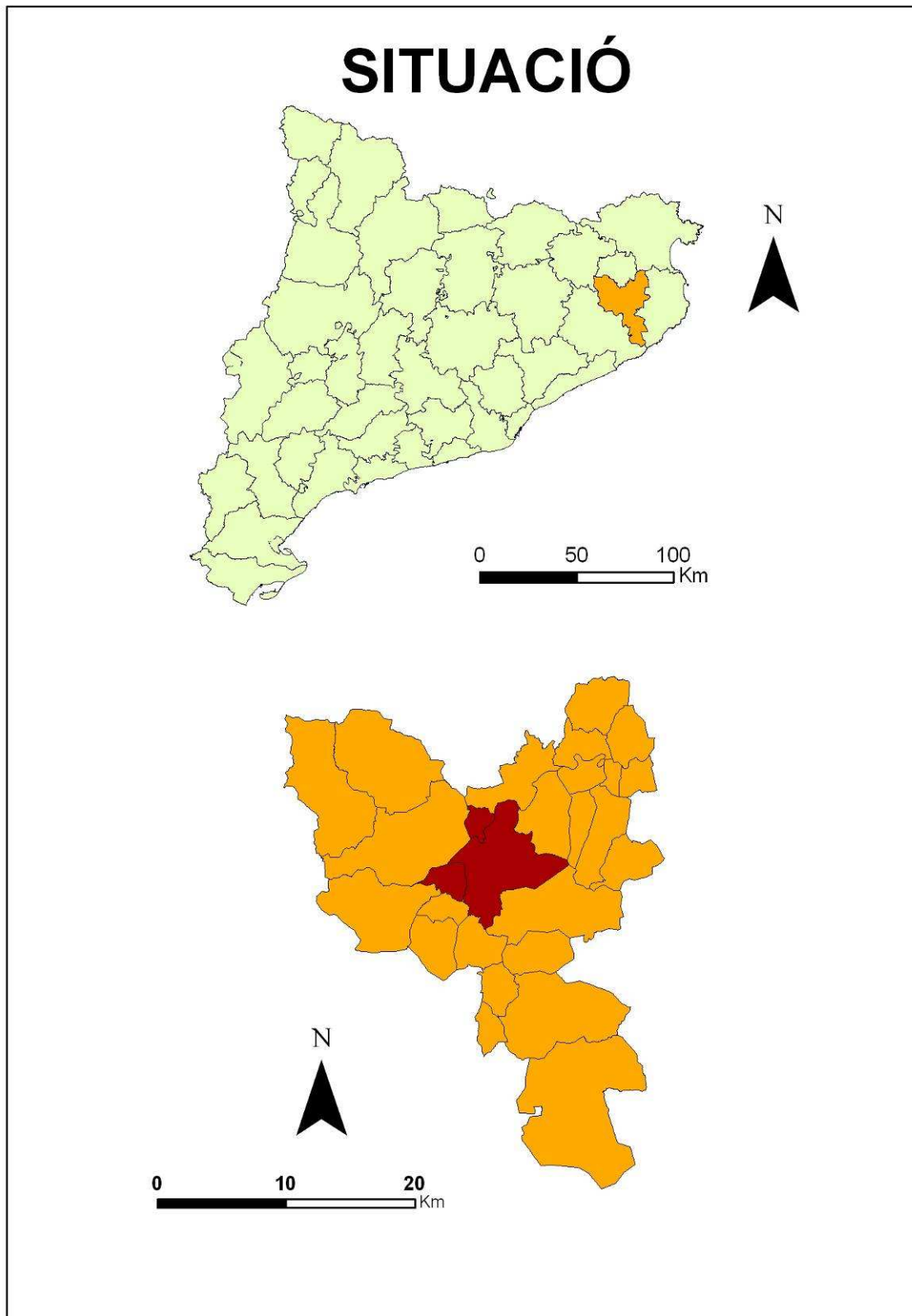
6.1. El Gironès: Situació geogràfica i socioeconòmica

El projecte s'emmarca en l'àmbit territorial de l'àrea del Gironès, i més detalladament en el municipi de Campdorà.

El Gironès és una comarca a mig camí entre el mar i la muntanya que limita amb les comarques de la Selva, el Baix Empordà, l'Alt Empordà, el Pla de l'Estany i la Garrotxa. Comprèn una plana central, on és situada la capital, voltada al nord-oest per la serra de Rocacorba, al sud-est per les Gavarres i la Serralada Litoral i al sud-oest per les planes que s'estenen fins a les vores mateixes del Ter.

Les característiques climàtiques de la comarca són típicament mediterrànies, però hi ha un contrast evident entre el sector septentrional, obert a la mar, i el meridional, tancat per les Gavarres. Les màximes i les mínimes absolutes corresponen al Sud. La pluviositat és relativament abundant (806 mm anuals a Girona).

La comarca del Gironès forma part de la conca del riu Ter i els seus afluents. Aquest riu travessa la comarca de sud-oest a nord-est i forma un sistema hidrogràfic que és el gran col·lector comarcal. Per a la banda esquerra rep les aigües de Rocacorba i de gran part del Pla de Banyoles (el Terri) i per la banda dreta rep l'Onyar, el Güell i el Galligants.



Font: ICC

En el barri de Campdorà, situat a Girona, és on es troba la planta incineradora de residus sòlids urbans (RSU), que tracta els residus de la ciutat de Girona, i de les poblacions de Salt i Sarrià de Ter, entre d'altres nuclis de menor població. Al costat mateix de l'incineradora es troba la depuradora d'aigües residuals.

El barri de Campdorà es situa a una posició septentrional respecte la ciutat de Girona, trobant-se rodejat pel riu Ter i el massís de les Gavarres.

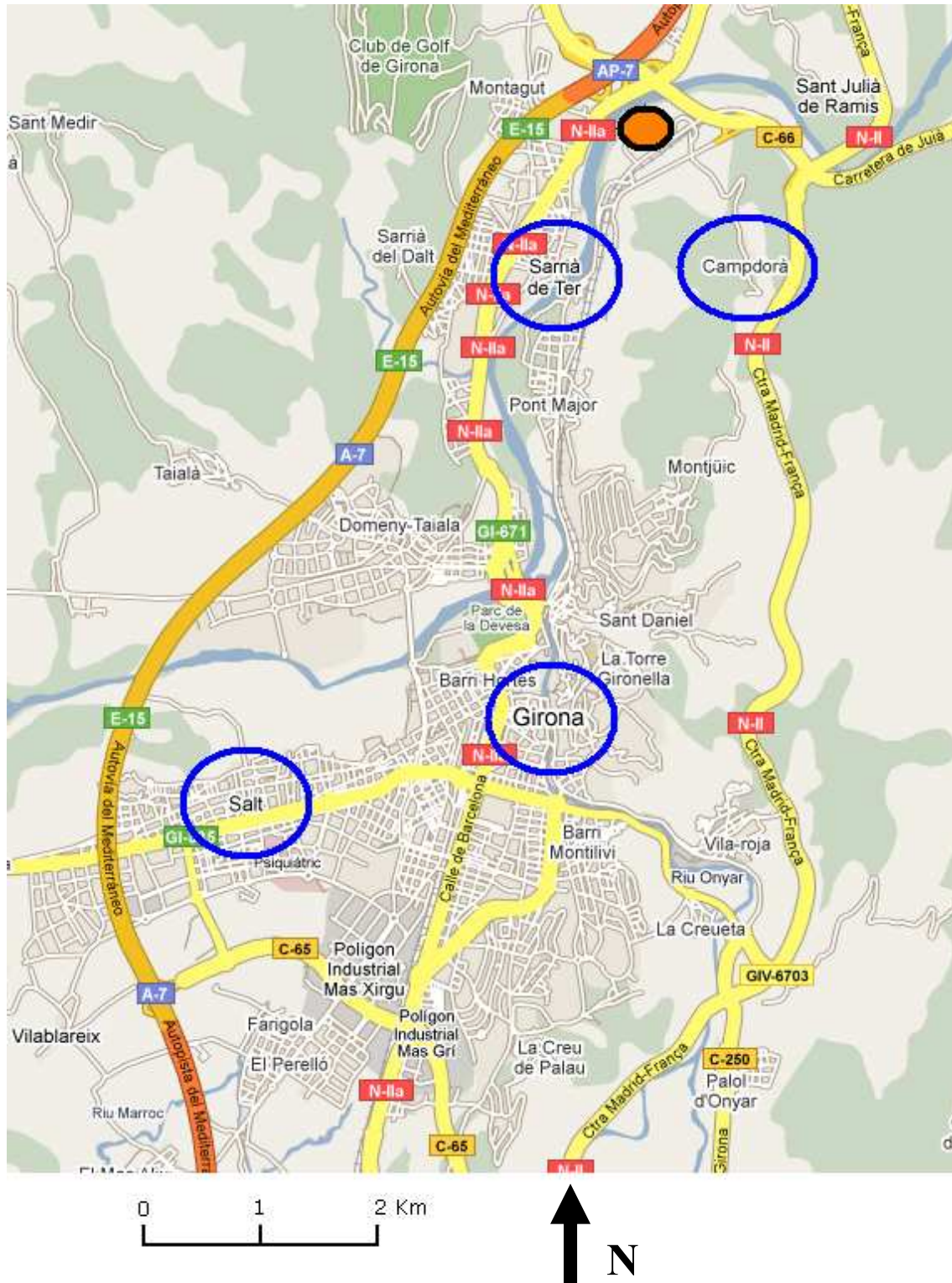


Situació de la incineradora i la depuradora a Campdorà
Font: icv-euia-girona.blogspot.com

El barri consta d'una superfície de 5,76 km² i d'una població de 199 habitants, segons el cens de la població corresponent a l'any 2005 (Font: Ajuntament de Girona).

Pel que es refereix a la situació de la biota, el barri de Campdorà és una zona de característiques rurals.

Situació geogràfica de les poblacions que envien RSU a la incineradora de Campdorà:



Font: <http://maps.google.es>

6.1.1. Girona

La ciutat de Girona està ubicada a la banda nord-est de Catalunya, sent la capital de la província homònima i de la comarca del Gironès. Pertany a l'àmbit de les comarques gironines i al sistema urbà de Girona, segons el Pla Territorial General de Catalunya.

Limita al Nord amb Sant Julià de Ramis i Sarrià de Ter, a l'Est amb Celrà, al sud-est amb Juià i Quart, al sud-oest amb Fornells de la Selva, Vilablareix i Salt, i a l'Oest amb Sant Gregori.

La ciutat es troba en una zona de gran densitat fluvial, doncs la travessen els rius Ter, Güell, Onyar i Galligants, i es troba a una altitud de 75 m sobre el nivell del mar.

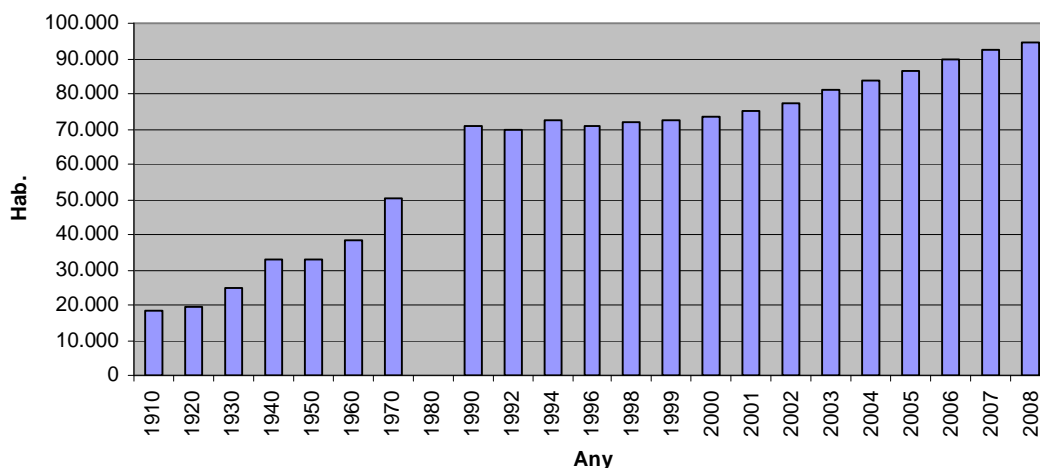
Girona està dins de la zona temperada. Les temperatures mitjanes anuals oscil·len entre els 14°C i els 18°C. La província és més freda en comparació al Nord i Oest, mentre que les zones més càlides es localitzen a la costa (influenciat per les aigües tèbies del Mediterrani).

Superfície: 39,1 km²
 Densitat de població: 2.415,2 hab./km²

Evolució demogràfica de la població de Girona:

<u>Any</u>	<u>1910</u>	<u>1920</u>	<u>1930</u>	<u>1940</u>	<u>1950</u>	<u>1960</u>	<u>1970</u>
Hab.	18.386	19.393	24.683	33.018	32.773	38.385	50.338
<u>1980</u>	<u>1990</u>	<u>1992</u>	<u>1994</u>	<u>1996</u>	<u>1998</u>	<u>1999</u>	<u>2000</u>
-	70.876	69.570	72.333	70.576	71.858	72.682	73.637
<u>2001</u>	<u>2002</u>	<u>2003</u>	<u>2004</u>	<u>2005</u>	<u>2006</u>	<u>2007</u>	<u>2008</u>
75.256	77.475	81.220	83.531	86.672	89.890	92.186	94.484

Font: IDESCAT



Font: elaboració pròpia

La població de Girona, des de la dècada dels 50 fins a inicis dels 90, experimenta un fort creixement demogràfic. Entrada la dècada dels 90 però, pateix una important frenada en el creixement poblacional i no és fins entrat el segle XIX quan torna a experimentar un creixement positiu uniforme. El creixement en aquesta darrera dècada ha significat un increment del 22,05% en el nombre d'habitants.

Per estudiar la situació econòmica s'ha agafat com a principal i més significatiu indicador el Producte Interior Brut (PIB).

Producte interior brut a preus de mercat (PIB pm):

Any	PIB pm	PIB pm per habitant	
	Milions d'euros	Milers d'euros	Índex Catalunya=100
2001	2.030,9	26,6	126,1
1996	1.474,9	20,9	143,3
1991	1.122,7	16,4	153,6

Font: IDESCAT

En els anys 1991 i 1996, el PIB per habitant de la ciutat de Girona corresponien a 16,4 i 20,9 milers d'euros respectivament, que significaven en valor d'índex 153,6 i 143,3 cadascun. L'any 2001, el PIB per habitant corresponia a 26,6 milers d'euros que representava en valor d'índex 126,1.

Així doncs, s'observa com creix el PIB per habitant en milers d'euros alhora que disminueix el valor de l'índex al llarg dels anys. Tenint en consideració que l'índex total en l'àmbit català correspon a 100, les dades reflecteixen una situació favorable econòmicament parlant.

6.1.2. Salt

Salt és un municipi de la comarca del Gironès, que s'estén per la riba dreta del riu Ter, a la província de Girona. Està situat a l'extrem centre-oest de la comarca, junt a la ciutat de Girona amb la que forma conurbació. Al Nord i a l'Oest limita amb el municipi de Sant Gregori; al Sud, amb els de Bescanó i Vilablareix; i a la banda Est, amb el de Girona. És el segon municipi més gran de l'àrea urbana de Girona. El municipi té una superfície total de 6'6 km² i es troba situat a 83,7 m sobre el nivell del mar.

Les condicions geogràfiques i la situació limítrof amb Girona han condicionat el desenvolupament i trajectòria de la comunitat de Salt. L'existència de la sèquia Monar va facilitar el creixement de l'activitat agrícola, així com el naixement de l'activitat industrial tèxtil que ha caracteritzat el poble.

La proximitat amb Girona, ha aportat els avantatges de la capitalitat però ha fet que Salt acollís tot allò que Girona no ha volgut o pogut assumir. Encara avui, la població del municipi està obligada a desplaçar-se per accedir a nombrosos equipaments i serveis públics.

La situació i creixement urbanístic de Salt ha estat fruit de processos d'expansió econòmica que han comportat importants immigracions. A la segona meitat del segle XIX amb la instal·lació de tres grans indústries tèxtils i l'expansió del barri del veïnat.



Fàbrica tèxtil Coma - Cros, Salt.
Font: www.webgipal.net

Al llarg del segle XX amb la primera arribada d'immigració procedent de la resta de l'estat, que va ocupar l'espai urbà resultat de l'especulació urbanística de l'època franquista.

Actualment, Salt segueix essent un poble que acull bona part de població treballadora nouvinguda, així com de població que es desplaça des de Girona i d'altres municipis ja que el preu de l'habitatge és comparativament més econòmic. Salt és un poble que creix.

Malgrat que Salt ha estat tradicionalment una població industrial, ha sofert en els darrers 25 anys el procés de terciarització propi del desenvolupament econòmic a escala global.

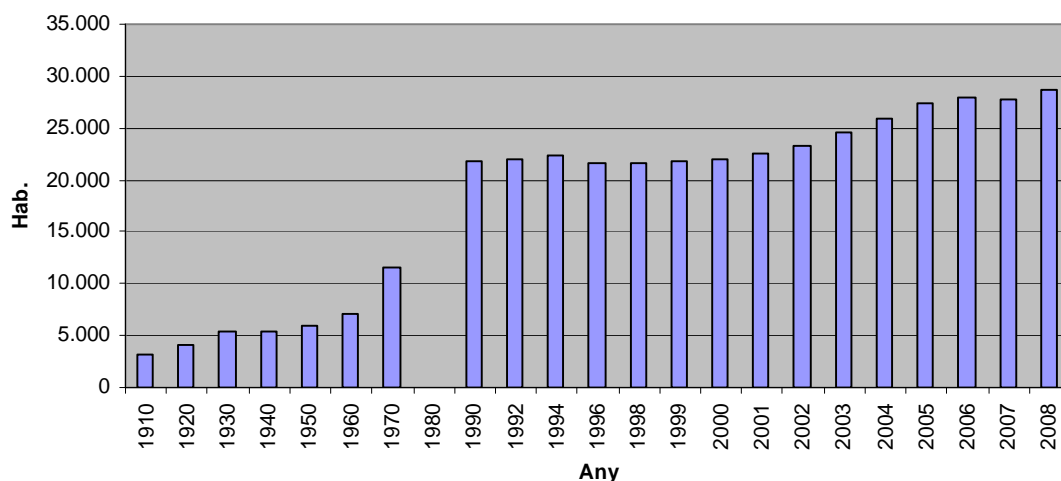
Així, pel que fa a l'activitat econòmica, predomina l'activitat de serveis i comerç que constitueix el 65%, seguida de la construcció amb un 18%, les activitats professionals amb un 9% i la indústria que actualment suposa només el 8% de l'activitat econòmica de Salt. Les activitats tradicionals agrícoles, especialment la de les hortes regades per la sèquia Monar, es troben en regressió.

Superfície 6,6 km²
 Densitat de població 4.331,8 hab./km²

Evolució demogràfica de la població de Salt:

<u>Any</u>	<u>1910</u>	<u>1920</u>	<u>1930</u>	<u>1940</u>	<u>1950</u>	<u>1960</u>	<u>1970</u>
Hab.	3.125	4.185	5.360	5.321	5.956	7.077	11.467
<u>1981</u>	<u>1990</u>	<u>1992</u>	<u>1994</u>	<u>1996</u>	<u>1998</u>	<u>1999</u>	<u>2000</u>
-	21.738	21.979	22.274	21.519	21.678	21.822	22.017
<u>2001</u>	<u>2002</u>	<u>2003</u>	<u>2004</u>	<u>2005</u>	<u>2006</u>	<u>2007</u>	<u>2008</u>
22.472	23.214	24.513	25.912	27.370	28.017	27.673	28.763

Font: IDESCAT



Font: elaboració pròpia

La Vila de Salt ha crescut de forma exponencial durant el segle XX, període en què ha triplicat la població, essent avui en dia el municipi amb més densitat de població de les comarques gironines. Segons dades del 2004 correspon a una densitat de 4.249 persones per km².

Algunes de les causes de tal efecte són la prosperitat de la indústria tèxtil, la millora de la xarxa de comunicacions o fins i tot la saturació urbanística del municipi veí de Girona. La població de Salt passa de poc més de 7.000 habitants el 1960, fins arribar als 11.477 el 1970, fruit de la gran immigració provinent majoritàriament d' Andalusia.

Als inicis del segle XXI la població de Salt arriba a les quasi 30.000 persones i és formada per un mosaic de nacionalitats, entre les quals destaquen els col·lectius marroquí (4.852 veïns), gambià (1.780) i llatinoamericà.

Durant el període que va des de l'any 1998 fins el 2007, aproximadament una dècada, la població de Salt ha crescut un 21,66%. Aquest creixement experimentat per la població de Salt ha estat tan significatiu com el de la població de Girona durant els anys 1998-2007, fruit de la seva proximitat, tot i que en els últims anys, no s'observa una clara tendència a l'alça.

Com a tret característic, Salt presenta un major índex d'immigració censat que la resta de poblacions de la comarca del Gironès.

Producte interior brut a preus de mercat (PIB pm):

Any	PIB pm	PIB pm per habitant	
	milions d'euros	milers d'euros	índex Catalunya=100
2001	221,9	9,7	46,1
1996	157,3	7,3	50,1
1991	138	6,3	59,4

Font: IDESCAT

L'any 2001, el PIB per habitant de la Vila de Salt es corresponia a 9,7 milers d'euros per habitant, que representava en valor d'índex 46,1. Per tant és desfavorable ja que està per sota de l'índex mitjà de Catalunya.

6.1.3. Sarrià de Ter

Sarrià de Ter és un municipi situat a la comarca del Gironès. L'extensió del municipi és relativament reduïda, i ocupa una superfície lleugerament superior als 4 km² (4,16 km²). Està format pels nuclis de població de Sarrià de Dalt i Sarrià de Baix, i es troba situat a 70 m sobre el nivell del mar.

El municipi de Sarrià de Ter es troba situat al nord-est de Catalunya, a l'àrea central de la província de Girona i, concretament, al nord de la comarca del Gironès. El seu emplaçament resulta singular perquè pràcticament conflueixen en ell la Serralada Transversal Catalana, la Serra de les Gavarres, la Depressió Neògena de la Selva i el corredor que comunica aquesta depressió amb la Fossa de l'Empordà.

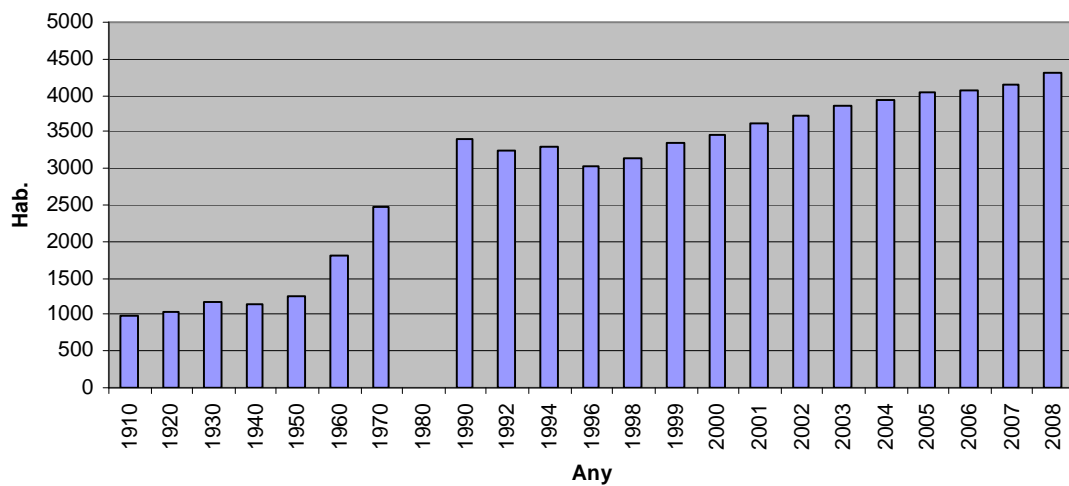
El pas del riu Ter per la zona confereix al municipi un valor especialment destacable i contribueix a l'increment de la seva biodiversitat, en especial pel que fa al bosc de ribera, de gran interès per a les aus. En aquest mateix indret hi trobem un braç mort del riu Ter que augmenta el seu valor per a la fauna.

Superfície 4,16 km²
 Densitat de població 1.038,5 hab./km²

Evolució demogràfica de la població de Sarrià de Ter:

<u>Any</u>	<u>1910</u>	<u>1920</u>	<u>1930</u>	<u>1940</u>	<u>1950</u>	<u>1960</u>	<u>1970</u>
Hab.	991	1.033	1.176	1.134	1.258	1.821	2.471
<u>1981</u>	<u>1990</u>	<u>1992</u>	<u>1994</u>	<u>1996</u>	<u>1998</u>	<u>1999</u>	<u>2000</u>
-	3.403	3.247	3.290	3.032	3.139	3.347	3.457
<u>2001</u>	<u>2002</u>	<u>2003</u>	<u>2004</u>	<u>2005</u>	<u>2006</u>	<u>2007</u>	<u>2008</u>
3.610	3.730	3.858	3.930	4.036	4.065	4.144	4.320

Font: IDESCAT



Font: elaboració pròpia

Sarrià de Ter era una població que es basava en l'activitat agrícola, que poc a poc va anar desapareixent després de la construcció en el terme municipal d'una fàbrica de pasta de paper.

Durant el segle XX l'activitat industrial estava especialment dedicada a la fabricació i manipulació del paper, que va convertir-se en la principal font d'ingressos del municipi.



Fàbrica TorrassPaper S.A., Sarrià de Ter.

En l'actualitat, compta amb una població de 4.533 habitants (febrer 2009), amb una alta previsió de creixement, donat bàsicament per la urbanització de noves zones, així com per la desaparició de la fabricació de pasta de paper, que ha comportat la millora ambiental i de qualitat de vida per a la població.

Durant aproximadament l'última dècada, entre els anys 1998 i 2007, Sarrià de Ter ha augmentat la seva població de 3.139 a 4.144 habitants, que representa un increment del 24,8%.

Pel que fa a la situació econòmica del municipi no hi ha dades disponibles corresponents al seu PIB ja que el municipi no té un cens de població prou important.

6.2. La incineradora

La planta incineradora de residus sòlids urbans (RSU) de Girona, Salt i Sarrià de Ter va ser inaugurada l'1 de gener de l'any 1984.

Està situada al barri de Campdorà de Girona i en l'actualitat solament tracta la fracció resta dels RSU de les poblacions de Girona, Salt i Sarrià de Ter, i d'alguns altres petits nuclis urbans. **Presta els serveis a 110.000 habitants.**



Incineradora de Campdorà
Font: www.diaridegirona.cat

La propietat de la planta pertany als ajuntaments de Girona, Salt i Sarrià de Ter, mentre que de l'explotació se n'encarrega Tractament de Residus i d'Aigües Residuals del Sistema de Girona, S.A.

Dades tècniques de la planta:

Hores/any operació	7400 h
Tipus de residus	Residus sòlids urbans (RSU)
Nombre línies actuals	2
Capacitat d'incineració per línia en T/h	2,5
Tipus de forn	Graella Martin
Tª de combustió (mitja)	1.050 °C
P.C.I. del combustible	RSU de 1.400/2.000 Kcal/Kg
Tones incinerades/any	35.000
Potència màxima	1.900 KW
Tipus de condensador	De tubs, per aigua de la planta depuradora
Sistema de depuració de gasos	Sec amb electrofiltres i filtres de mànegues
Reactius	Ca(OH) ₂ sec i urea
Injecció carbó actiu	Sí
Nombre treballadors	25

 Font: www.aeversu.com
El sistema de tractament de residus per incineració té avantatges:

- Requereix un espai més reduït que altres tractaments.
- Redueix el volum de residus a abocar.
- Pot recuperar l'energia continguda en els residus en forma de calor.

Però també té una sèrie d'inconvenients:

- Converteix les escombraries en cendres altament tòxiques que necessiten abocadors especials.
- Requereix la retenció o depuració de substàncies gasoses tòxiques, abans que siguin alliberades.
- Els metalls pesats no són destruïts per la incineració.

Normativa:

En el procés que té lloc a la incineradora es garanteix un tractament dels residus respectuós amb el medi, complint la normativa vigent i els límits d'emissió.

Amb la **Directiva 2000/76/CE** (Annex 1), de 4 de desembre, relativa a la incineració de residus, s'han fixat en l'àmbit de la Unió Europea els requeriments aplicables a aquesta activitat de gestió de residus.

La transposició de la Directiva 2000/76/CE s'ha materialitzat a Espanya en el **Real Decreto 653/2003** (Annex 2), de 30 de maig, sobre incineració de residus que entrà en vigor el 28 de desembre de 2005.

Amb aquesta nova regulació, s'ha produït una reducció substancial dels límits d'emissió a l'atmosfera contemplats en la legislació vigent a Catalunya fins llavors (**Decret 323/1994** (Annex 3), de 4 de novembre, pel qual es regulen les instal·lacions d'incineració de residus i els límits de les seves emissions a l'atmosfera).

Així mateix, totes les emissions passen a ser mesurades de forma contínua amb analitzadors i mostrejadors instal·lats a la xemeneia de la planta. A més, es mantenen les mesures periòdiques (quatre anuals) realitzades per una entitat col·laboradora de l'Administració.

Els sistemes de depuració de gasos existents a la planta es mostren totalment efectius per a aconseguir, sense dificultats tècniques, els nivells de qualitat ambiental establerts legalment.

Amb l'adopció del nou sistema complementari de tractament amb microalgues, s'aconseguiria reduir l'emissió de CO₂ des de la incineradora directament a l'atmosfera.

Dades tècniques durant l'exercici 2007:

Tones entrades al centre	38.182
Tones incinerades	28.743
Venda neta energia elèctrica	3.446.861 KWh
Producció energia elèctrica	6.834.000 KWh

Font: www.aeversu.com

Al **2007**, la planta incineradora de residus de Campdorà va estar en funcionament un total de 7.050 hores i va tractar **28.743 tones de residus**, de les quals un 72,75% provenien de Girona i un 27,25% de Salt i Sarrià de Ter. Les emissions atmosfèriques de la planta van representar un cabal de **38.194 Nm³/hora**.

Al **2008**, la planta incineradora de residus de Campdorà va estar en funcionament un total de 7.400 hores i va tractar **28.390 tones de residus**. Les emissions atmosfèriques de la planta van representar un cabal de **41.638 Nm³/hora**.

6.2.1. Emissions de la incineradora

Les unitats són mg/Nm³ excepte per les dioxines i furans que són ng/Nm³ (1 ng equival a 1·10⁻⁶ mg). Totes les dades es donen corregides a les mateixes condicions estàndard de: T^a=273°K, P=101,3 KPa, 11% d'O₂ i gas sec.

Paràmetre	Límit	Mitjana 2006	Mitjana 2007	Mitjana 2008
Partícules totals	10	3,5	5,53	5,93
Monòxid carboni CO	50	4,3	34,35	32,25
Òxids nitrogen NO _x	400	150	299,87	225,48
Clorhídric HCl	10	9,5	4,48	6,56
Fluorhídric HF	1	<0,6	0,42	0,05
Diòxid sofre SO ₂	50	36	14,43	20,68
Metalls pesants: Hg	0,05	nd	0,004	0,0028
Metalls pesants: Cd+Tl	0,05	nd	0,011	0,0051
Metalls pesants: Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V	0,5	0,016	0,032	0,0096
Compostos orgànics COT	10	7,5	3,13	6,53
Dioxines i furans	0,1	0,018	0,0031	0,0034

Font: www.ajuntament.gi/mediambient/qualitat_ambiental.php

* *nd* significa que la mesura de l'element està per sota dels nivells de detecció dels aparells utilitzats, i que per tant el seu valor està molt per sota dels límits establerts per la actual legislació.

Efectivament, es pot comprovar com cap de les emissions dels diferents compostos, durant els últims tres anys, supera el límit d'emissió a l'atmosfera. Per tant, compleix la legislació perfectament.

6.2.2. Evolució incineradora

Des de la seva inauguració l'any 1984, la planta incineradora de Campdorà ja estava equipada d'un **filtre electrostàtic** per tal de reduir les emissions dels gasos a l'atmosfera. Aquest filtre servia per eliminar les cendres o partícules contingudes en el gas. Però en aquesta època, encara es seguien alliberant elements contaminants cap a l'atmosfera.

Va ser l'any 1997 quan la planta va incorporar el **filtre de mànegues** per tal de reduir les emissions. Aquest es situa a la part inferior de la xemeneia, i està previst principalment de 4 compartiments de 184 filtres cadascun que retenen les partícules contaminants.

Com que en el seu moment, les xemeneies existents no s'adaptaven per adoptar aquest nou sistema de filtrat, es va optar per construir-ne una de nova.

Ja entrat l'any 2000, es decideix fer un pas més i realitzar la depuració dels gasos per mitjà de **calç i carbó actiu**; materials previstos d'una gran capacitat d'adsorció i retenció de partícules, així com també alhora de fer les funcions de neutralització dels àcids.

Quatre anys més tard, es decideix incorporar un nou sistema per tal de reduir les concentracions d'òxids de nitrogen i d'aquesta manera assolir els nous límits d'emissió establerts aleshores. Aquest nou sistema es basa en la injecció d'**urea** en estat líquid directament a l'interior dels forns durant el procés de combustió.

Pel que respecte a l'energia, cal dir que des de l'any 1990, la planta incineradora de Campdorà comença a generar energia elèctrica a partir de la calor dels fums que són alliberats del propi procés d'incineració. Per dur a terme aquest procés s'adopta un cicle tèrmic consistent en una turbina combinada amb un alternador.

La valorització energètica dels residus que s'hi realitza compleix amb la legislació vigent a Catalunya (**Decret 323/1994** i **Llei 11/2000** (Annex 4), que regulen les instal·lacions d'incineració de residus i els límits de les seves emissions a l'atmosfera).

La planta incineradora de Campdorà, com qualsevol incineradora de residus sòlids urbans, es troba sotmesa a un control especial d'emissions, molt més estricte que fent la comparativa amb d'altres tipus d'empreses.

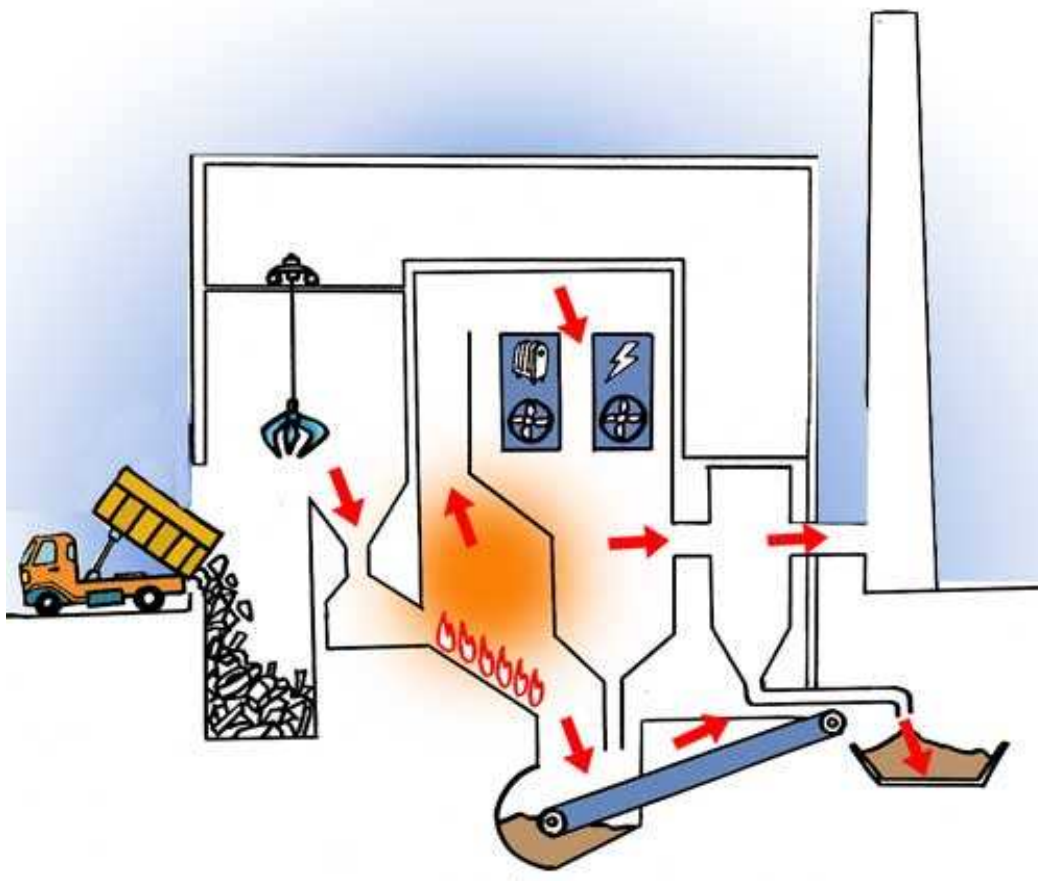
Actualment, les instal·lacions també estan preparades per complir els límits més estrictes derivats de la **Directiva Europea 2000/76/CE**, relativa a la incineració de residus.

A dia d'avui, la planta disposa d'aparells que mesuren de forma contínua les emissions atmosfèriques de contaminants com les partícules, CO, NO_x, HF, HCl, COT i SO₂.

També, i tal i com estableix la normativa actual, estan sota la jurisdicció que els obliga a rebre mesures de les emissions de forma periòdica per una Entitat Col·laboradora de l'Administració (ECA). Aquesta entitat realitza les mesures dels compostos esmentats i també en d'altres com els metalls pesants, les dioxines o els furans que cal realitzar-los en laboratoris.

6.2.3. Descripció del procés d'incineració

Esquema general del procés d'incineració:



Font: escuelas.consumer.es

En el procés d'incineració, el primer pas és recollir tots els residus sòlids urbans per tal de portar-los cap a la planta incineradora. Una vegada arriben els camions a la planta, hi ha un control on determinen el pes del camió i la procedència d'aquest. Ja passat aquest control d'entrada, els vehicles de transport poden abocar els residus a un fossat d'una capacitat aproximada de 1200 m³. Tot seguit, els camions tornen a ser pesats per així determinar quina càrrega de residus transportaven.

La segona fase consisteix a moure els residus per mitjà d'una grua per tal d'airejar-los, al mateix temps que s'agafen per introduir-los en els forns, que es troben a una temperatura superior a 1000°C per tal de ser eficients alhora d'eliminar les dioxines.



Font: www.laregion.es

A la planta incineradora de Campdorà, les condicions de combustió aproximades són d'un 13% d'oxigen, una temperatura de 1150°C i una injecció d'urea al 45 %.

Els forns de la incineradora són rotatoris, i estan dissenyats amb una certa pendent per tal que els residus vagin lliscant fins al final de la pendent, on s'acumulen les restes dels residus incinerats, els vidres i la ceràmica esmicolada (també anomenada escòria) i la ferralla.

Una vegada incinerats, els productes surten per una comporta que només s'obre un cop acabada la incineració, per tal de no perdre calor de combustió, i es deixen caure a una sitja amb aigua per tal de disminuir la seva temperatura.

Tot seguit, les restes incinerades es fan caure a una cinta mecànica que els transporta fora de la planta. Allà hi té lloc un mecanisme per separar l'escòria i la ferralla.

A hores d'ara s'estan duent a terme algunes actuacions per tal de millorar alguns aspectes de la planta, com són la futura habilitació d'una zona per emmagatzemar les escòries o la construcció d'una cuneta al voltant de la planta d'incineració a fi de recollir els líquids despresos per la pròpia escòria i l'aigua de la pluja. Finalment aquests líquids residuals es portaran fins a un col·lector de la depuradora.

Un bon ús que se li dóna actualment a un producte residual com les escòries és la seva reutilització per la construcció, fent la funció com a material de rebliment. Abans però, cal que es deixin madurar durant almenys dos mesos, per posteriorment fer uns anàlisis de lixiviats, metalls pesants, arseni i níquel.

Una vegada hem donat utilitat als residus sòlids, també s'ha de procurar de donar-ne als residus en forma gas. No estem parlant de la seva depuració, sinó de donar-los una funció útil abans de ser alliberats.

Per tal de complir d'alguna manera amb aquesta funció, el fum que surt de la incineració es fa circular cap a una caldera equipada de tubs plens d'aigua que refreden els gasos, que inicialment estan a uns 650°C, fins a uns 300°C, produint així un intercanvi de calor entre els gasos i l'aigua.

L'aigua dels tubs es transforma a vapor, que posteriorment fa girar una turbina i mitjançant l'alternador s'obté electricitat. A la planta s'obtenen aproximadament 1.350 KW/h generats per aquest sistema.

Com que la incineradora consumeix menys energia que aquesta generada, això permet vendre l'energia a la xarxa. L'energia produïda serveix pel consum propi de la incineradora i per la depuradora (900 KW/h per la incineradora i la depuradora), i la resta es ven a la xarxa.

Finalment, una vegada el fum s'ha valoritzat passant per la caldera per produir energia, es tracta per mitjà de l'electrofiltre que eliminarà les partícules més grans, majoritàriament cendres. Aquest aparell funciona carregant amb energia electrostàtica les partícules i fent-les passar per una zona d'elevada tensió.

Seguidament, quan les partícules ja estan carregades, es fan passar per un model de reixa carregada amb signe contrari, on aquestes s'hi queden adherides. Llavors aquestes partícules es recullen fent vibrar els barrots, i s'acumulen per mitjà de la seva caiguda en una sitja de residus especials.

En aquesta etapa els fums es refreden dels 300 als 200°C, i s'hi afegeix hidròxid de calci i carbó actiu per neutralitzar els àcids i per adsorbir partícules contaminants respectivament.

El darrer tractament dels gasos abans de ser alliberats correspon al filtre de mànegues. Aquests filtres estan previstos de quatre compartiments amb 184 filtres cada un, els quals retenen més partícules contaminants. Per desadherir aquestes substàncies del

filtre s'injecta aire a pressió, que fa vibrar els filtres per fer caure les partícules en una altra sitja de residus especials.

Tots aquests productes acumulats a les sitges de residus especials (tant en el procés de l'electrofiltre com en el filtre de mànegues) són productes contaminats, i per tant han de ser tractats per una altra empresa, especialitzada en aquest sector.

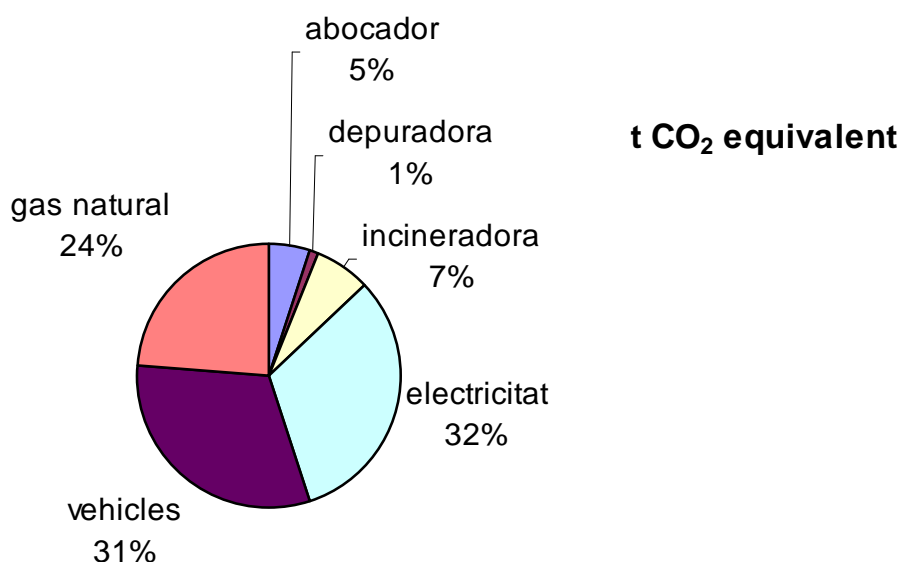
Com a darrer pas i una vegada passats per tots els processos, el gasos són alliberats per la xemeneia. Però abans de la seva emissió a l'atmosfera, es mesuren en continu les diferents concentracions dels contaminants emesos.

6.3. Emissions de gasos a Girona

Girona, a causa del consum energètic i els residus que produeix, és responsable directe de l'emissió a l'atmosfera de **més de mig milió anual** de tones equivalents de CO₂.

Això representa **6,7 tones anuals per habitant**. Els combustibles dels vehicles representen gairebé una tercera part de les emissions, igual que el consum d'electricitat. Els residus, en el seu conjunt, representarien el 13% de les emissions.

Proporció de CO₂ alliberat a l'atmosfera:



Font: www.ajuntament.gi/mediambient/qualitat_ambiental.php

6.4. Residus sòlids urbans a Girona i Catalunya

A continuació, es fa una anàlisi dels residus generats a Girona i Catalunya durant varis períodes de temps. Per una banda s'estudiarà la procedència d'aquests residus, és a dir el seu origen, així com del tipus de residu que és.

Per altra banda, s'analitzarà el tractament que se'n farà per tal de donar-los un destí, fixant-nos especialment en l'aplicació de la incineradora.

Residus municipals generats Catalunya el 2006:

	Tones	Variació anual (%)	Coef. de generació (kg./hab./dia)
Deposició controlada	2.109.398	0,26	0,81
Incineració	655.952	-3,24	0,25
Tractament	138.391	-41,12	0,05
Deposició no controlada	-	-	-
Recollida selectiva vidre i paper	603.177	6,28	0,23
Altra recollida selectiva	751.473	14,00	0,29
Total residus generats	4.258.391	1,65	1,64

Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient i Habitatge.
Agència de Residus de Catalunya

Com mostra la taula anterior, els principals residus generats a Catalunya provenen de la deposició controlada, que representa aproximadament la meitat del total dels residus generats en el territori català.

En segon lloc es situa la recollida selectiva, que pren cada any més força degut a la conscienciació de la població i a la creixent preocupació pel medi ambient. No només representa la segona fracció més gran de residus, sinó que també es pot comprovar com és amb diferència el que més augmenta respecte l'any anterior, amb un 14%.

Això provoca doncs, cada any, una major eficiència en la selecció dels residus i el seu tractament posterior, millorant alhora el respecte pel medi ambient.

Els residus generats per la incineració es troben en tercer lloc, i representen una mitjana de generació de residus incinerats de 0,25 Kg per cada habitant i dia. Equival a dir que cada persona necessita 4 dies per generar 1 Kg de residus d'incineració.

En penúltim lloc es situen els processos de tractament, que representen només una petita part del total, i que han sofert un dràstic descens de la seva significació respecte l'any anterior. Concretament han disminuït més d'un 40%.

Pel que fa al sistema de deposició no controlada, es veu com a Catalunya no s'han generat cap residu provinent concretament d'aquest tractament.

Residus Industrials generats a Catalunya durant el període 2002-2006 per sectors d'activitat: (Tones)

Sectors d'activitat CCAE-93	2002	2003	2004	2005	2006
10 Carbons	30 120	18 583	14	11	32
15 Alimentació i begudes	1 214 935	1 306 053	1 188 730	1 242 620	1 263 190
17 Indústria tèxtil	138 555	124 203	122 827	108 610	107 934
19 Cuir i calçat	60 354	50 743	38 868	31 740	32 298
20 Fusta i suro (llevat mobles)	155 058	188 233	165 696	138 265	122 274
21 Paper	381 757	381 554	407 288	390 130	357 938
22 Edició i arts gràfiques	136 648	117 742	139 372	152 471	157 284
24 Química	649 089	631 886	642 348	624 496	674 636
25 Cautxú i plàstic	118 182	122 653	133 054	153 786	132 205
26 Minerals no metàl·lics	219 603	257 895	301 867	355 806	432 645
27 Metal·lúrgia	426 643	395 371	458 856	596 009	563 040
28 Productes metàl·lics	354 305	354 844	372 185	332 829	431 908
29 Maquinària i equips mecànics	73 694	71 430	75 200	75 493	85 714
31 Maquinària i material elèctric	66 873	65 620	65 114	70 404	68 087
34 Vehicles de motor i remolcs	305 263	317 024	319 956	320 197	343 425
36 Mobles i altres manufactures	57 694	75 602	65 901	58 595	80 541
37 Reciclatge	230 343	161 488	181 603	218 374	109 382
40 Electricitat, gas i aigua	183 314	101 245	138 066	101 800	149 182
90 Sanejament públic	1 029 659	1 031 764	1 297 244	1 185 591	664 873
0 Altres	100 231	91 193	117 127	212 634	129 030
Total	5 932 320	5 865 126	6 231 316	6 369 862	5 905 618

Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient i Habitatge.
Agència de Residus de Catalunya.

Tal com mostra la taula anterior, els residus més generats a Catalunya amb cert avantatge respecte als altres, són les restes d'alimentació i begudes. Aquests no representen cap problema ja que són compostos orgànics que poden ser incinerats sense cap dificultat.

Aquests representen més d'una sisena part dels residus totals. Però també hi ha altres tipus de residus que poden ser incinerats com poden ser els residus provinents de la indústria tèxtil, del calçat, de la fusta, etc.

Hi ha d'altres residus com el paper, el cartró o els plàstics, que si fossin incinerats no representarien cap problema en el procés de combustió. Però tot i així, és preferible que rebin un tractament de reciclatge o reutilització per tal de reduir el consum primari.

D'altres en canvi, no poden ser incinerats degut a que la combustió no és capaç d'eliminar-los del tot, o per la seva perillositat i que requereixen d'un tractament més específic o controlat.

Residus Industrials generats el 2006 (Tones):

	Establiments declarants	Residus		Total
		especials	no especials	
Gironès	324	17.909	167.366	185.275
Catalunya	15743	730.448	5.175.170	5.905.618

Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient i Habitatge.
Agència de Residus de Catalunya.

Els residus generats es poden classificar en especials i no especials. Els residus no especials són aquells no perillosos o que no cal que rebin un tractament personalitzat, i representen un 88% dels residus totals generats en l'àmbit territorial català.

Pel que respecte al Gironès, aquests encara incrementen la seva proporció fins a un 90,3%. Això pot ser degut a que el territori gironí està per sota la mitjana catalana en el nombre o densitat d'indústries productores de residus.

A més a més, també influeixen fets com l'absència de cap gran empresa com poden ser centrals de producció d'energia nuclear com sí hi ha al territori tarragoní.

Destinació dels residus municipals generats el 2006:

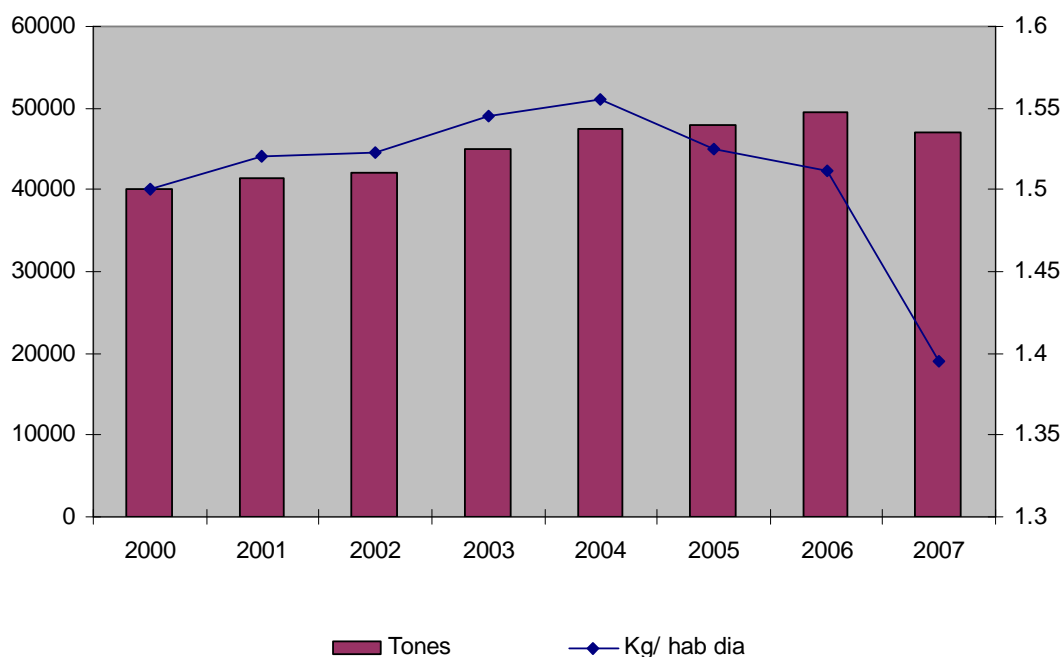
	Coeficient de generació (Kg/hab./dia)	Destinació				Total
		Abocador	Incineradora	Metanització	Recollida selectiva	
Gironès	1,42	15.984	38.334	-	32.297	86.614
Catalunya	1,64	2.110.748	650.284	138.391	1.360.559	4.259.982

Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient i Habitatge. Agència de Residus de Catalunya.

Els trets més destacables de la taula anterior són el menor coeficient de generació de residus a Girona respecte al total de Catalunya, així com l'absència del procés de metanització en comarques gironines.

Situació dels Residus Sòlids Urbans a la ciutat de Girona:

El següent gràfic indica tant la producció de residus municipals com la generació de residus per càpita a Girona.



Font: elaboració pròpia

Al llarg del període 2000-2007 hi ha una tendència de creixement pel que respecte al total de tones de residus municipals. El fet que al 2007 en disminueixi la producció, s'explica perquè en aquest any s'elimina la recollida de residus provinents de comerços. Actualment, aquests establiments gestionen els seus residus privadament.

Els residus per càpita generats tenen una línia clarament ascendent en un principi degut a l'augment de la qualitat de vida de les persones. A partir del 2004, aquesta tendència pren un sentit descendent, segurament degut a la no recollida residual en comerços i a l'augment de la població de Girona, que provoca que s'hagin de repartir més els recursos entre la població. A més a més, també influeix la crisi econòmica actual a nivell global.

Percentatges dels tractaments als que s'han destinat els residus sòlids urbans a Girona: (%)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Abocador	25	29	30	37	34	33	23	17
Incineradora	66	58	58	50	50	45	48	45
Tractament especial	9	13	12	13	16	22	29	38

Font: www.ajuntament.gi/mediambient/qualitat_ambiental.php

En línies generals, es comprova una clara tendència de disminució de l'ús de tècniques com incineració i abocador, afavorint l'expansió dels tractaments especials, que augmenten en gran mesura la seva proporció respecte al total. Això s'explica per l'augment de recollida selectiva, on cada producte residual rebrà el seu tractament especial.

Tot i haver perdut pes, la incineració continua essent la opció més freqüent. Tot i passar d'un 66% a un 45%, continua essent superior als residus destinats a l'abocador o a tractaments especials.

Al llarg de l'any 2007, la incineradora de Campdorà va tractar 28.743 tones de residus, de les quals un 72,74 % provenien de Girona i un 27,25 % de Salt i Sarrià de Ter.

6.5. La depuradora i les aigües residuals

6.5.1. Xarxa de clavegueram i col·lectors

Al municipi de Girona regeix la Ordenança Municipal sobre l'Ús del Sistema de Sanejament, aprovada el 23 de juliol del 1996 (Publicació al BOP núm. 122 Data: 30-08-96), que té per objecte garantir el correcte funcionament del sistema de sanejament de Girona (SSG) en la seva totalitat, així com dels seus components:

- Instal·lacions interiors.
- Connexions de servei.
- Xarxa de clavegueram.
- Xarxa de col·lectors.
- Estació de tractament i depuració d'aigües residuals de Campdorà.
- Abocament final al riu Ter.

L'objecte de la Ordenança és caracteritzar i regular els límits de les característiques físico-químiques dels abocaments de líquids residuals que es poden descarregar, i donar instruccions sobre l'ús i les connexions de serveis particulars a la xarxa de clavegueram.

La Ordenança estableix que totes les aigües no domèstiques requereixen permís municipal d'abocament. Del conjunt de 571 empreses i activitats inspeccionades els darrers anys, a la ciutat de Girona, un 68% disposava de permís d'abocament. La majoria de particulars i establiments comercials i industrials de Girona estan connectats al sistema públic de sanejament.

6.5.1.1. Organismes competents

L'ajuntament de Girona com a Administració Actuant i, a través de l'empresa municipal **DARGISA**, té delegades les tasques de gestió del Sistema de Sanejament de Girona (Girona, Salt, Sarrià de Ter, Sant Julià de Ramis, Aiguaviva, Vilablareix i part de Fornells de la Selva). Aquesta gestió comprèn la xarxa de col·lectors d'alta i l'estació depuradora d'aigües residuals (EDAR) de Campdorà.

La societat **DARGISA** (Depuració d'Aigües Residuals del Sistema de Girona, S.A. és una empresa municipal dels ajuntaments de Girona (73% de l'accionariat), Salt (23% de l'accionariat) i Sarrià de Ter (4% de l'accionariat) que s'encarrega des de l'any 1987 de:

- L'explotació de la Planta Depuradora d'Aigües Residuals de Campdorà.
- L'explotació de la xarxa de col·lectors en alta del Sistema de Girona, la qual cosa inclou el manteniment dels col·lectors, la gestió de la redacció dels projectes i la realització d'obres noves, de reparació i de millora del Sistema.
- Inspecció i control d'abocaments d'origen industrial a la xarxa i al medi.

L'ajuntament de Girona ha encomanat a l'empresa **Aigües de Girona, Salt i Sarrià de Ter, S.A.** la gestió, el control i el manteniment del servei de sanejament de baixa.

Aigües de Girona, Salt i Sarrià de Ter és una empresa mixta: el 80% del capital és privat, la resta és públic dels ajuntaments de Girona (14%), Salt (4%) i Sarrià de Ter (2%).

Aquesta empresa té un contracte de prestació de serveis amb aquests ajuntaments fins al 31 de desembre del 2012. Dins dels serveis que ofereix hi ha el subministrament en baixa als municipis de Girona, Salt i Sarrià de Ter; i el subministrament en alta als municipis de Bescanó, Sant Julià de Ramis, Vilablareix i al Consorci de la Costa Brava.

6.5.1.2. Xarxa de clavegueram i col·lectors

El sistema de sanejament de Girona (SSG) està constituït per la xarxa de col·lectors que recullen aigües residuals i pluvials de Girona, Salt, Sarrià de Ter, Sant Julià de Ramis, Vilablareix i part de Fornells de la Selva, i les fa arribar a l'estació depuradora de Campdorà on són tractades. La xarxa de col·lectors té una longitud aproximada de 50 Km i està gestionada, controlada i mantinguda per **DARGISA**.

Una bona part dels col·lectors tenen el recorregut, en la seva totalitat o parcialment, dins de rius o rieres i aquest fet dificulta el seu manteniment.

L'Ordenança Municipal sobre l'Ús del Sistema de Sanejament estableix la separació de les aigües pluvials i les aigües residuals sempre que sigui factible. Així i tot, la xarxa de clavegueram de la ciutat de Girona és bàsicament unitària. El sistema de col·lectors actual no està dissenyat per absorbir tota l'aigua de pluja i hi ha problemes de sobreiximent directe d'aigües negres als rius en moments puntuals d'alt cabal.

6.5.1.3. Problemàtiques detectades

La xarxa de sanejament del Sistema de Girona actua bé i amb normalitat en períodes de temps sec. En períodes de pluja és produeixen entrades importants d'aigües degut a la gran incorporació d'aigües de pluja al sistema, que el sobrecarreguen i provoquen que l'aigua surti pels embornals o que aquests engoleixin malament.

6.5.2. Producció d'aigües residuals

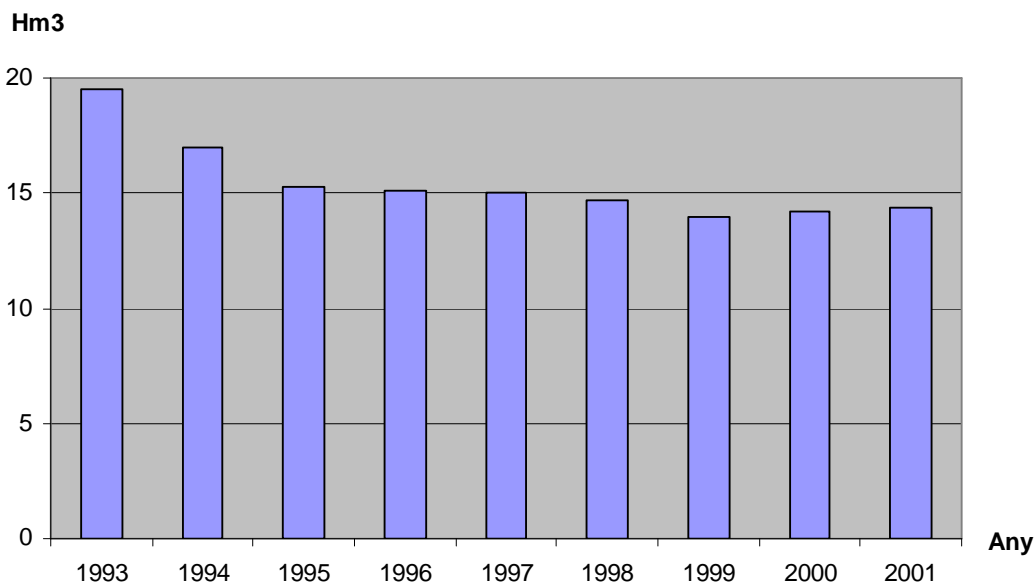
L'any **2001** van arribar a la planta de Campdorà un total de **14.407.172 m³**, i que equivaldrien a 395 litres per habitant i dia (considerant una població de 100.000 habitants pel conjunt del Sistema de Sanejament de Girona).

Aquests més de 14 Hm³ però, són només una part de les aigües recollides pel sistema de col·lectors, ja que en moments de pluja intensa el sistema de col·lectors és incapaç de canalitzar tota l'aigua recollida cap a la planta depuradora i utilitza el sistema de sobreexidors per canalitzar l'aigua sobrant cap als rius de la ciutat.

L'any 2001, el servei d'aigües potables va posar a la xarxa 9,4 Hm³ d'aigua, el que representa només el 67% de l'aigua que arriba a la depuradora. La resta d'aigua pot tenir el seu origen en explotacions de pous, pluja o aigües blanques paràsites.

Cal tenir present però, que el Sistema de Sanejament de Girona no té el mateix àmbit geogràfic que el servei d'abastament d'aigües potables, i que una part desconeguda de les aigües es desvien cap als sobreexidors, per la qual cosa fer un balanç global és complicat.

Evolució del cabal (Hm³/any) arribat a la EDAR de Campdorà:



Font: *Agenda 21 local de Girona*

La disminució important de cabals que arriben a l'estació depuradora de Campdorà es deu en bona part a les obres de millora efectuades en els col·lectors, que han deixat de rebre volums destacables d'aigües blanques.

6.5.3. Sistemes de sanejament i depuració

6.5.3.1. EDAR de Campdorà

L'estació depuradora d'aigües residuals (EDAR) de Campdorà, situada a una zona contigua a la planta incineradora es va inaugurar l'any 1986 i estava projectada per tractar 40.000 m³/dia.

Inicialment aquesta tractava les aigües residuals recollides de Girona, Salt i Sarrià de Ter; i després s'hi van connectar les aigües de Bescanó (sector Pla de Montfullà), Sant Julià de Ramis, Aiguaviva, Vilablareix, una part de Fornells de la Selva, un polígon de Palol de Revardit i el polígon de Torre Mirona.

La planta està equipada amb tractament biològic i digestió anaeròbia de fangs, i té una capacitat de tractament inicial de 40.000 m³/dia, amb un cabal mitjà de sortida de 0,4-0,5 m³/s.

Gràcies a l'ampliació de la planta amb un tractament fisicoquímic a l'any 1990 el cabal màxim tractat actualment és 45.000 m³/dia. Tot i així, s'origina el desguàs de cabal en excés d'abans del tractament secundari al riu Ter, això implica un impacte ambiental important.

Aquesta situació ha desencadenat una **nova ampliació que s'està realitzant en aquets moments i que possibilitarà el tractament de 55.000 m³/dia** i la farà apte per adaptar-se al nou Pla Director del sanejament de l'àrea metropolitana de Girona.

Els principals elements de la planta són:

- Bombament i pretractament.
- Decantació primària.
- Tractament biològic.
- Decantació secundària i recirculació.
- Espessidor de fangs.
- Digestió anaeròbica dels fangs.
- Motor de cogeneració alimentat pel biogàs del tractament anaeròbic.
- Deshidratació dels fangs.
- Sitja de fangs.

Actualment, l'explotació de la planta depuradora d'aigües residuals i de la planta incineradora de residus sòlids urbans, la realitza l'empresa **TRARGISA** (Tractament de Residus i d' Aigües Residuals del Sistema de Girona, S.A.), tot i que són propietat dels ajuntaments de Girona, Salt i Sarrià de Ter.

Com a Administració Actuant de la gestió de les aigües residuals hi ha l'**Ajuntament de Girona**, i com a empresa que gestiona el Sistema de Sanejament de Girona hi ha l'empresa municipal **IRSURSA** (Servei Municipal d' Incineració de Residus Sòlids Urbans i Industrials, S.A.). Aquesta gestió comprèn la xarxa de col·lectors d'alta i l'estació depuradora d'aigües residuals (EDAR) de Campdorà.

Al 1997 s'afegeix en la gestió del Sistema de Sanejament de Girona l'empresa **Aigües de Girona, Salt i Sarrià de Ter, S.A.**, que s'encarrega de la gestió, el control i el manteniment del servei de sanejament de la xarxa de baixa.

6.5.3.2. Explotació de la planta depuradora

La marxa de la planta continua estant condicionada per les puntes de cabal que hi arriben i sobretot per l'estacionalitat. Així, a l'estiu l'aigua que arriba a planta és tractada totalment, mentre que la resta de l'any, a les hores punta, una part té solament tractament primari.

Evolució dels cabals arribats a la EDAR de Campdorà i tractaments:

Any	Entrats a la planta m ³	Tractament primari m ³	Tractament complet m ³
1995	15.282.918	1.242.045	14.040.873
1996	15.199.495	700.537	14.498.958
1997	15.063.479	642.722	14.420.757
1998	14.590.677	366.244	14.626.921
1999	13.823.951	131.694	13.692.257
2000	14.066.831	621.920	13.444.911
2001	14.407.172	1.943.954	12.463.218

Font: Agenda 21 local de Girona

L'any 2001, van entrar a planta un total de 14.407.172 m³. D'aquests, 1.943.954 m³ que representa un 13 %, van rebre només tractament primari (físicoquímic i decantació primària), i la resta (12.463.218 m³, un 87%) van rebre tot el tractament complet (físicoquímic, decantació primària, tractament biològic aeròbic i clarificació).

El consum elèctric general de la planta depuradora va ser l'any 2001 d'uns 0,286 kWh/m³ d'aigua tractada, molt similar al de l'any anterior (0,29 kWh/m³).

L'autogeneració elèctrica amb biogàs va cobrir el 21,8% del consum total de la planta.

6.5.4. Qualitat de les aigües

Tal i com s'observa en la següent taula i gràfics, la qualitat de sortida de l'aigua depurada és bona, amb nivells dels paràmetres de contaminació per sota dels autoritzats en el permís d'abocament.

També es pot veure en la següent taula, consistent en les característiques físico-químiques de l'aigua a l'entrada i sortida de la planta depuradora a l'any 2001, com les sortides de N i P són 23 i 3 mg/L respectivament. A partir d'aquests valors no podem fer cap balanç de matèria ni determinar el component limitant ja que valors més actuals difereixen d'aquests valors corresponents al 2001.

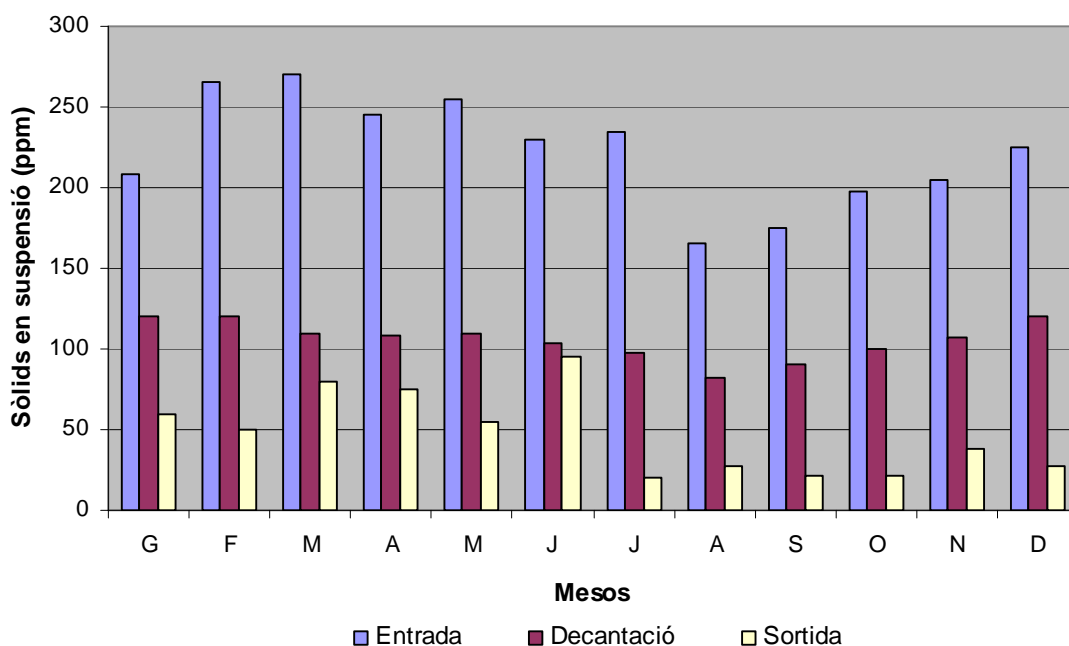
Concretament, el 2007, l'aigua de sortida de la EDAR conté unes concentracions de N i P de 2 i 0,6 mg/L respectivament. Serà a partir d'aquests valors que es calcularà més endavant el component limitant i se'n farà el balanç de matèria.

Característiques físico-químiques de l'aigua a l'entrada i a la sortida de la planta depuradora a l'any 2001 (unitats en ppm):

	AIGUA ENTRADA PLANTA							SORTIDA DECANTADOR PRIMARI							SORTIDA CLARIFICADORS						
	SS	SSV	DQO	DBO	Nitróg.		P-Total	SS	SSV	DQO	DBO	Nitróg.		P-Total	SS	SSV	DQO	DBO	Nitróg.		P-Total
					Kjeldal	N. NH4						Kjeldal	N. NH4						Kjeldal	N. NH4	
GENER	209	167	498	209	61	32	7,5	120	92	379	166	61	33	6,5	58	47	123	39	41	30	3,4
FEBRER	266	213	608	196	76	36	8,3	119	93	388	150	55	36	7,0	47	37	102	20	42	33	3,4
MARÇ	269	210	606	169	69	37	7,8	116	91	388	148	60	36	6,8	80	63	133	23	39	33	3,1
ABRIL	246	197	590	173	49	37	8,5	110	87	376	140	54	35	6,7	72	57	143	22	41	30	3,7
MAIG	255	195	584	217	65	29	6,8	112	90	367	159	56	31	6,2	55	42	109	29	39	30	2,8
JUNY	232	192	561	162	58	33	6,8	103	83	364	131	53	31	6,0	92	73	146	41	37	29	3,0
JULIOL	234	186	540	162	49	30	7,5	97	79	328	127	44	30	6,1	21	15	64	8	25	20	2,8
AGOST	168	137	448	180	51	30	6,8	84	67	323	130	41	28	5,9	27	21	65	15	24	13	2,9
SETEMBRE	174	134	424	140	50	29	5,6	89	70	290	104	46	28	5,1	16	12	59	9	17	13	2,6
OCTUBRE	199	162	505	182	40	27	6,2	99	78	369	136	32	29	5,7	17	13	68	12	13	10	2,5
NOVEMBRE	204	164	526	201	70	33	7,3	104	82	368	137	65	37	6,0	31	19	81	12	23	16	2,9
DESEMBRE	221	180	561	235	73	37	8,3	120	94	416	188	62	39	6,9	28	22	90	19	28	22	3,0
MITJANES	223	178	538	185	59,3	33	7,3	106	84	363	143	52,4	32,6	6,2	52	41	99	21	31	23	3,0

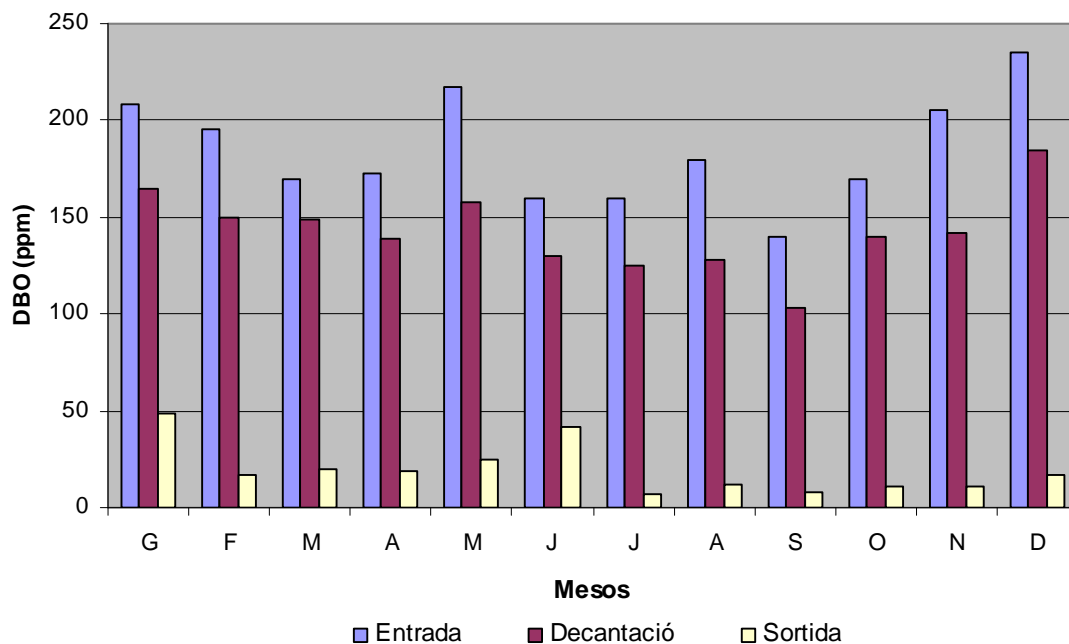
Font: Agenda 21 Local Girona

Mitjanes mensuals (any 2001) dels sòlids en suspensió a la Planta Depuradora:



Font: Agenda 21 local de Girona

Mitjanes mensuals (any 2001) de la demanda bioquímica d'oxigen (DBO):



Font: Agenda 21 local de Girona

6.5.4.1. Reutilització de les aigües i fangs

El Golf Girona (municipi de Sant Julià) reutilitza les aigües depurades a la EDAR de Campdorà. Està previst potenciar la reutilització de les aigües depurades tot millorant el servei ofert (incloure la desinfecció en el procés de tractament de l'aigua) i incrementant els usuaris.

L'any 2001, la producció de fangs deshidratats va ser de 8.095 tones, amb una sequedat mitjana del 18,3%, que es van evacuar des de la sitja. Del total, 7.915 tones es van destinar a l'agricultura com a millora del sòl i 180 tones a la producció de compost, mitjançant un contracte de gestió amb l'empresa PRODEASA.

D'altra banda, els residus obtinguts en les diferents etapes del procés de depuració es recullen en contenidors. L'empresa *Containers MORALES* s'encarrega de recollir els contenidors i transportar-los a la planta de Cruïlles.

L'any 2001 es van recollir 383 tones totals de diferents tipus de residus, els quals es repartien de la següent manera:

Cisternes (Tn)	Reixes (Tn)	Greixos (Tn)	Sorres (Tn)	Flotants (Tn)	Sedassos (Tn)	Devastació prèvia (Tn)
7	58	21	23	7	143	124

Font: Agenda 21 local de Girona

7. METODOLOGIA

La metodologia aplicada en aquest projecte contempla un estudi d'articles especialitzats en el tema, una recopilació de la informació que afecta a la zona i a la població, i una recerca per conèixer de ben a prop com funcionen i els paràmetres de treball de les plantes de depuració i incineració de Campdorà.

Com a resultat d'aquest mètode i recerca d'informació prèvia, i per elaboració pròpia, es dissenyarà i projectarà un sistema de producció de microalgues, consistent en un fotobiorreactor, per tal de generar biomassa amb l'objectiu final de produir energia. Però, per dur a terme aquest pas, prèviament s'ha conegut la situació i la forma de treball de les dues plantes, tant de depuració com d'incineració.

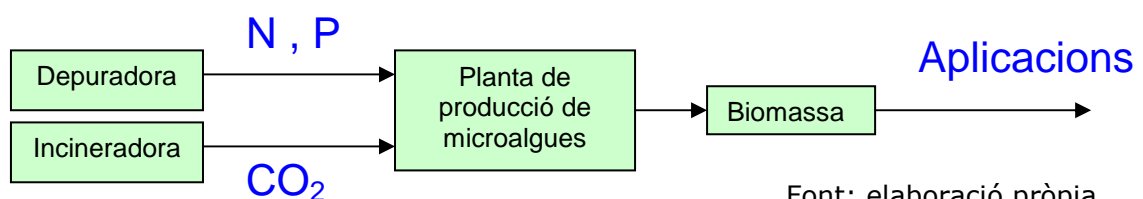
Es pretén implantar doncs, una planta de producció de microalgues per tal de complementar la depuració de les aigües de la EDAR. Per tant, es busca reduir els nivells d'amoni i fòsfor de les aigües de sortida de la EDAR (40.000 m³/dia), així com reutilitzar el CO₂ emès per la incineradora de Campdorà (41.638 Nm³/hora al 2008, amb un 10% de CO₂).

7.1. Esquema i descripció general del sistema

Es treballarà a partir de les aigües de sortida de la depuradora de Campdorà, ja que aquestes aigües encara porten nutrients com amoni i fòsfor. Tot i que ja compleixen els límits legals d'abocament, es pretén reduir més el seu contingut.

Per obtenir el CO₂, s'aporta de la sortida de gasos de la incineradora de Campdorà. Tot i que aquesta sortida també compleix amb la normativa vigent d'emissions, es pretén reutilitzar-lo per evitar o reduir la seva emissió a l'atmosfera, donant-li així un nou ús.

Amb la combinació de les dues entrades en el fotobiorreactor, es pretén produir microalgues, que finalment es podran aprofitar energèticament o per altres aplicacions.



Font: elaboració pròpia

7.2. Les microalgues

Els organismes fotosintètics inclouen plantes, algues i alguns bacteris. La fotosíntesis és la clau per fer disponible l'energia solar i donar-li formes útils per les formes de vida orgàniques del nostre medi. Aquests organismes utilitzen aquesta energia del sol per combinar l'aigua amb diòxid de carboni per tal de crear biomassa.

Les microalgues són organismes fotosintètics microscòpics, bé unicel·lulars o simples multicel·lulars, que es troben principalment en hàbitats aquàtics. Aquestes poden fixar CO₂ eficientment de diverses fonts, incloent l'atmosfera, gasos industrials o de sals carbonatades solubles.

Representen la forma més primitiva de plantes. Varen ser els primers organismes amb capacitat de fotosíntesis i un dels principals agents en la creació de la actual atmosfera terrestre. Les microalgues poden créixer en medi aquós (en condicions salines o no) i no necessiten d'herbicides. Destaquen per la seva alta eficiència fotosintètica, ràpid creixement, possibilitat de ser cultivades a gran escala, produir molt més a igual superfície i per fixar grans quantitats de CO₂, el que facilita la seva reducció a l'atmosfera.

Mentre que el mecanisme de fotosíntesis a les microalgues és similar al de les plantes superiors, generalment són més eficients en la conversió de l'energia solar degut a la seva estructura cel·lular simple. A més a més, com que les cèl·lules creixen en una suspensió aquosa, tenen un millor accés a l'aigua, al CO₂ i als nutrients. Per aquestes raons, **les microalgues són capaces de produir unes 30 vegades la producció de les plantes terrestres.**

La estratègia de mitigació de CO₂ per mitjà de microalgues ofereix nombrosos avantatges:

- Les microalgues fixen CO₂ alhora que capturen l'energia solar o llumínica amb una eficiència 10-50 vegades major que les plantes terrestres.
- Tenen uns nivells de creixement i unes habilitats de fixació de CO₂ molt més grans en comparació a la silvicultura tradicional, a l'agricultura i a les plantes aquàtiques.
- Poden reciclar completament el CO₂ ja que aquest és convertit a energia química via fotosíntesis, que pot ser convertida a combustibles o altres productes amb les tecnologies existents.

- No està subjecte al Protocol de Kyoto, ja que el CO₂ que alliberen les microalgues al cremar prové d'una reutilització anterior del mateix gas.
- Pot ser més econòmic en cost-efecte i ambientalment més sostenible.

A més a més, la utilització de les aigües pel cultiu de microalgues suposarà un major eliminació de fòsfor i nitrogen.

Moltes espècies exhibeixen un ràpid creixement i una alta productivitat, i moltes poden ser induïdes a acumular quantitats substancials de lípids, a vegades majors que un 60% de la seva biomassa.

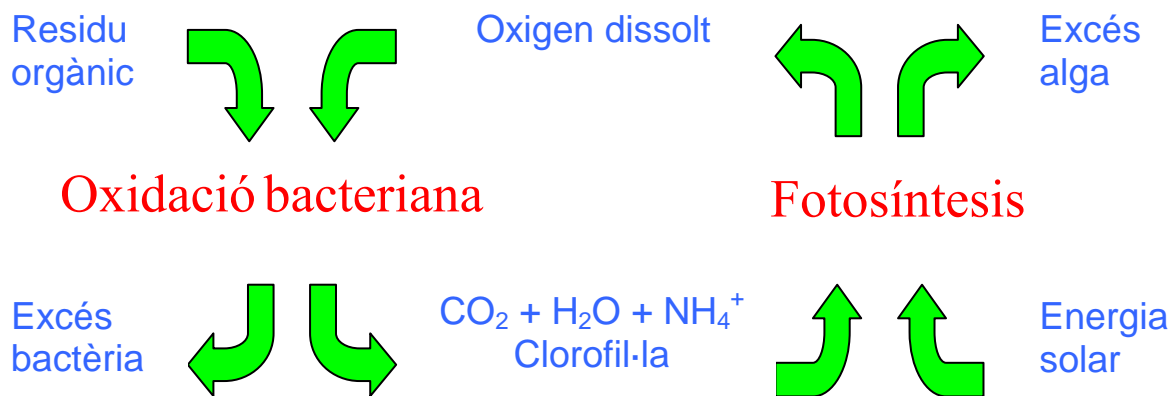
Les microalgues inclús poden créixer en medis salins, no adequats per la irrigació agrícola o pel consum per part d'humans o animals.

Els requeriments pel seu creixement són molt simples, principalment diòxid de carboni i aigua, encara que les velocitats de creixement poden ser accelerades mitjançant aeració o l'addició de nutrients.

Poden proveir moltes formes renovables de biocombustibles. La idea d'utilitzar microalgues com a font de combustible no és nova, però ara és presa seriosament degut a la pujada en els preus del petroli i, més significativament, per la creixent preocupació sobre el canvi climàtic associat a la combustió de combustibles fòssils.

Les microalgues poden actuar com a tractament terciari degut a la seva habilitat per incorporar nitrogen i fòsfor inorgànic en el seu creixement.

També actuen aportant l'oxigen en l'oxidació que requereixen les bacteries involucrades en el procés de degradació de la matèria orgànica.



Font: elaboració pròpia

Les microalgues poden fixar el diòxid de carboni de diverses fonts, que poden ser categoritzades com CO₂ de l'atmosfera, CO₂ de gasos industrials i CO₂ en forma de carbonats solubles.

Tradicionalment, les microalgues eren cultivades en sistemes airejats o exposats a l'aire per tal de permetre la captura del CO₂ de l'atmosfera pel creixement cel·lular. Com que l'atmosfera només conté un 0,03-0,06% de CO₂, era d'esperar les limitacions en el seu creixement.

Per altra banda, els gasos industrials contenen des d'un 15 % de CO₂, proveint-ne una font rica pel cultiu de microalgues i una ruta potencialment més eficient per la biofixació del CO₂. La tercera ruta és fixar el CO₂ per mitjà de reaccions químiques per produir carbonats i utilitzar-la com a font pel cultiu. (Font: Bei Wang, Yanqun Li, Nan Wu, Christopher Q. Lan. *CO₂ bio-mitigation using microalgae*. Appl Microbiol Biotechnol (2008) 79:707-718).

Un gran nombre de espècies de microalgues han demostrat ser capaces d'usar carbonats com el Na₂CO₃ i NaHCO₃ pel seu creixement. Algunes d'aquestes tenen altes activitats carboanhidrasa extracel·lulars, que són responsables de la conversió del carbonat a CO₂ lliure per facilitar-ne l'assimilació.

Hi ha varis grups de microalgues, que difereixen principalment en la seva composició de pigments, els constituents bioquímics, l'estructura i el cicle de vida. Sis grups adquireixen una importància principal:

➤ **Diatomees:**

Les diatomees estan entre els grups més extensament distribuïts; aproximadament se'n coneixen unes 100.000 espècies.

Aquest grup de microalgues tendeix a dominar el fitoplàncton dels oceans, encara que és més comú trobar-les en aigües dolces i residuals. Les cèl·lules són de color groc-marró a causa dels alts nivells del pigment ficoxantina. Altres xantòfits que són presents en menor quantitat, com els β -carotens o la clorofil·la A o C.



Diatomees

Els principals components emmagatzemats a les diatomees són lípids i crisolaminarina. Un tret distintiu de les diatomees és la presència d'una paret cel·lular que conté quantitats substancials de silici polimeritzat.

També es distingeix per ser diploide (té dues còpies de cada cromosoma) durant el creixement vegetatiu; la majoria de les algues són haploides excepte en els períodes en que les cèl·lules es reproduïxen sexualment.

➤ **Algues verdes:**

Normalment estan referides com a cloròfits. També són molt abundants; aproximadament unes 8.000 espècies. Aquest grup té clorofil·la A i B. **Utilitzen el midó com a component principal emmagatzemat.**

Tot i això, la deficiència de nitrogen promou l'acumulació de lípids en certes espècies. Les algues verdes són els avantpassats evolutius de les plantes superiors. Un grup que ha estat extensament estudiat és la *Chlorella sp.*



Cloròfits

➤ **Algues grogues - marrons:**

Referides com crisòfits, són similars a les diatomees en quant als pigments i a la composició bioquímica. Aproximadament 1.000 espècies són conegudes, que són principalment trobades en aigua dolça. Els lípids i la crisolaminarina són considerades les formes de carboni emmagatzemades més importants.



Crisòfits

➤ **Primnesiòfits:**

També coneguts com haptòfits, consisteixen en unes 500 espècies. Són principalment organismes marins, i poden ser considerats com una proporció substancial de la productivitat primària dels oceans tropicals. Com a les diatomees i crisòfits, la ficoxantina també els hi confereix un color marró a les cèl·lules. **Els lípids i la crisolaminarina són els components emmagatzemats més importants.**

➤ **Eustigmatòfits:**

Aquest grup representa un important component del fitoplàncton, que són els microorganismes de menys de 2 micròmetres de diàmetre. Se sap que el fitoplàncton és responsable de la major part de la fotosíntesi en les zones de mar obert. **Només tenen clorofil·la A.**

➤ **Cianobacteris:**

Són un grup de procariotes, i per tant molt diferent de tots els altres grups de microalgues. No tenen nucli, ni cloroplasts, i tenen una estructura genètica diferent. Són aproximadament unes 2.000 espècies, que estan presents en molts hàbitats.

Tot i que algunes espècies poden assimilar nitrogen atmosfèric, cap espècie produeix quantitats significants de lípids, i per tant no són útils.



Cianobacteris

La microalga *Chlorella sp.* és segurament l'espècie més favorable per dur a terme un procés de eliminació de CO₂ d'un corrent gasós, així com per reduir la quantitat de nutrients (P i N) de l'aigua sortint de la EDAR.

Aquesta presenta uns nivells de fixació del CO₂ superiors a 1 g CO₂ L⁻¹ dia⁻¹. A més a més, tolera temperatures de fins a 42°C i una concentració de CO₂ a l'aire de fins al 40%. Aquestes característiques la fan potencialment més apta per dur a terme la fixació de CO₂.

Altres microalgues estudiades:

Microalga	CO ₂ %	T °C	P g L ⁻¹ dia ⁻¹	P _{CO2} g L ⁻¹ dia ⁻¹
<i>Chlorococcum littorale</i>	40	30	N/A	1
<i>Chlorella kessleri</i>	18	30	0,087	0,163
<i>Chlorella sp. UK001</i>	15	35	N/A	>1
<i>Chlorella vulgaris</i>	15	-	N/A	0,624
<i>Chlorella sp.</i>	40	42	N/A	1
<i>Dunaliella</i>	3	27	0,17	0,313
<i>Haematococcus pluvialis</i>	16-34	20	0,076	0,143
<i>Scenedesmus obliquus</i>	18	30	0,14	0,26
<i>Botryococcus braunii</i>	-	25-30	1,1	>1
<i>Spirulina sp.</i>	12	30	0,22	0,413

Font: Bei Wang, Yanqun Li, Nan Wu, Christopher Q. Lan. *CO₂ bio-mitigation using microalgae*. Appl Microbiol Biotechnol (2008) 79:707-718

7.2.1. La tecnologia de les microalgues

Hi ha molts avantatges que promouen el desenvolupament de la tecnologia referent a les microalgues. Quatre àrees poden explicar aquest motiu.

Les dues primeres tracten a qüestions nacionals i internacionals que continuen creixent en importància: la seguretat energètica i el canvi climàtic.

Les altres dues es refereixen a aspectes més propis de la tecnologia de les microalgues, que les diferencien d'altres opcions tecnològiques.

➤ **La seguretat energètica:**

La seguretat energètica és la primera força que condueix el programa que tracta els biocombustibles als EUA, provinent del *Department Of Energy* (DOE's Biofuels Program).

➤ **El canvi climàtic:**

El CO₂ és reconegut com el contaminant atmosfèric més important, almenys en quantitat, que contribueix a l'efecte hivernacle.

➤ **La sinèrgia del carbó i les microalgues:**

Moltes de les reserves combustibles fòssils, especialment el carbó, jugaran un paper important en els pròxims anys. A escala mundial, el carbó és de llarg el recurs energètic fòssil més disponible.

Aproximadament una quarta part del carbó de reserva resta als EUA. Per posar en perspectiva, considerant una velocitat de consum com la que hi ha actualment, les reserves de carbó podrien cobrir els pròxims 200 anys.

El consum de carbó als EUA, una font de combustible abundant per generar electricitat, continuarà creixent en les pròximes dècades, tant als EUA com a tot el món.

La tecnologia de les microalgues pot estendre l'energia útil obtinguda de la combustió del carbó i reduir les emissions de carboni reciclant el CO₂ residual a biodiesel o a altres productes.

➤ **Biomassa terrestre – aquàtica:**

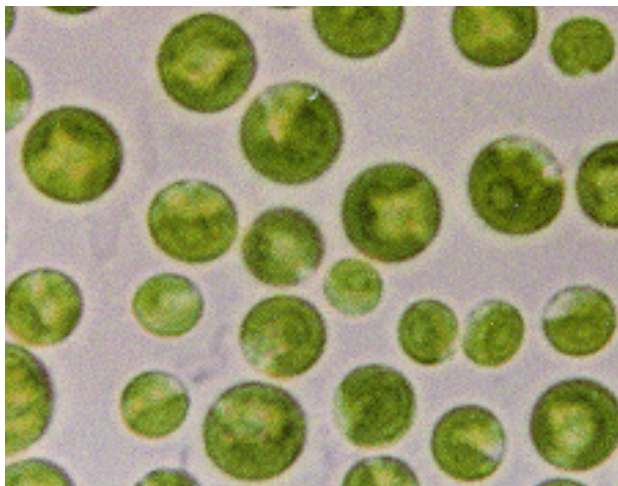
Les microalgues creixen en ambients aquàtics. En aquest sentit, la tecnologia de microalgues no competirà pel territori, que pot ser vist també per dur-hi a terme altres propostes o tecnologies per generar biomassa, generalment amb organismes de vida terrestre.

També pren importància que moltes espècies de microalgues poden créixer en aigua salobre o d'alt contingut de sals. Això significa que aquesta tecnologia no suposarà una demanda addicional d'aigua neta, necessària per usos domèstics, industrials i agrícoles.

En un món que es troba molt limitat pels recursos naturals, la tecnologia de microalgues ofereix l'oportunitat d'utilitzar àrees i fonts d'aigua no satisfactoris per qualsevol altre ús.

7.2.2. *Chlorella* sp.

La paraula *Chloros* significa en grec "verd", mentre que *ella* significa en llatí "petita".



Chlorella sp.

La *Chlorella* és un gènere d'algues verdes unicel·lulars, pertanyent al fílum dels cloròfits. Es tracta d'una alga esfèrica d'aigua dolça, que mesura aproximadament 2-10 µm de diàmetre, sense flagel.

Existeix a la Terra des de fa més de 540 milions d'anys. Per tant, es tracta d'una de les formes de vida més primitives i, sorprenentment la seva estructura genètica s'ha mantingut pràcticament intacta fins avui dia. La raó per la qual aquesta alga ha pogut sobreviure als canvis climàtics durant tots aquests milions d'anys radica en la gran duresa de la seva membrana cel·lular, capaç d'aïllar i protegir el material genètic del seu interior.

Per altra banda, també la seva extraordinària habilitat reproductora ha jugat al seu favor. Una sola cèl·lula de *Chlorella* pot reproduir-se per 4 en 20 hores.

Degut a la seva existència elemental i al seu ràpid creixement, la *Chlorella* conté una gran concentració i varietat de nutrients essencials per la vida, especialment proteïnes, vitamines i minerals. A més, constitueix la major font de clorofil·la que es pot trobar en un vegetal.

Conté els pigments verds fotosintetitzadors clorofil·la A i B en el seu cloroplast. A través de la fotosíntesis es multiplica ràpidament requerint només diòxid de carboni, aigua, llum i petites quantitats de minerals.

7.2.2.1. Composició de la *Chlorella sp.*

Elements (% pes)						
C	H	O	N	S	P	Cendres
54.0	8.6	31.0	3.3	0.36	0.95	2.1

Font: *Dioxide Fixation in Batch Culture of Chlorella sp. using a photobioreactor with a Sunlight-Collection Device.*

Energia potencial de combustió de l'alga: **$2,4 \times 10^4$ KJ/Kg** d'alga produïda.¹

Per estequiometria podem saber quins són els requeriments nutritius de l'alga.

$$CO_2 = \frac{54gC}{100gChlorella} * \frac{1molC}{12gC} * \frac{1molCO_2}{1molC} * \frac{44gCO_2}{1molCO_2} = 198gCO_2 / 100gChlorella$$

$$NH_4^+ = \frac{3,3gN}{100gChlorella} * \frac{1molN}{14gN} * \frac{1molNH_4^+}{1molN} * \frac{18gNH_4^+}{1molNH_4^+} = 4,24 gNH_4^+ / 100gChlorella$$

Si tenim en compte que el nitrogen total està en forma d'amoni, la quantitat de nitrogen serà:

$$N - NH_4^+ = \frac{3,3gN}{100gChlorella} = 3,3gN - NH_4^+ / 100gChlorella$$

$$HPO_4^{2-} = \frac{0,95gP}{100gChlorella} * \frac{1molP}{30,97gP} * \frac{1molHPO_4^{2-}}{1molP} * \frac{96gHPO_4^{2-}}{1molP} = 2,94gHPO_4^{2-} / 100gChlorella$$

Si tenim en compte que el fòsfor està en forma de fosfat, la quantitat de fòsfor serà:

$$P - HPO_4^{2-} = \frac{0,95gP}{100gChlorella} = 0,95 gP - HPO_4^{2-} / 100gChlorella$$

¹ Aquest valor es refereix exclusivament al poder calorífic de combustió de l'alga seca, i per tant no té en compte el consum energètic de la planta.

7.2.2.2. Reacció de fotosíntesi de la *Chlorella sp.*

$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Nutrients} + \text{Energia llumínica} + \text{baixa [Chlorella sp.]}$



$\text{increment important [Chlorella sp.]} + \text{O}_2$

Per cada kilogram de pes sec de *Chlorella sp.*² es necessita:

- **1,98 Kg CO₂**
- **0,029 Kg HPO₄⁻²**
- **0.042 Kg NH₄⁺**

I s'allibera al medi:

- **1,44 Kg d' O₂**

² S'han fixat unes concentracions d'alga a l'entrada i sortida del fotobiorreactor de 150 mg/L i 300 mg/L respectivament.

7.2.3. Eliminació dels nutrients de les aigües

7.2.3.1. Nutrició de les microalgues

La composició química de les microalgues està formada a partir d'elements que es troben en la pròpia composició de les aigües.

El medi de creixement ha d'aportar suficients nutrients pel creixement de les microalgues. El carboni, nitrogen, fòsfor i sofre són els elements més importants que constitueixen les cèl·lules de les microalgues.

També hi ha la presència d'oxigen i hidrogen provinent de l'aigua. Altres elements essencials inclouen el ferro, el magnesi i altres elements traces. L'estudi es centra bàsicament en el nitrogen i el fòsfor que són els que poden actuar com a limitant. Dels altres no se'n requereix tal quantitat i per tant no els tindrem en compte en el balanç de matèria posterior. És important desenvolupar un medi equilibrat per aconseguir un òptim cultiu de la microalga i la fixació del CO₂.

La producció de biomassa en els cultius de microalgues es fa de forma contínua durant les hores de sol o de dia. Però, a les hores de fosc, fins al 25% de la biomassa produïda pot arribar a perdre's a causa de la respiració. La magnitud d'aquestes pèrdues està lligada al nivell de llum i temperatura presents mentre creix la biomassa, i a la temperatura en les hores de fosc.

Els principals components de la biomassa de les microalgues són les proteïnes, els hidrats de carboni i els lípids. Aquests darrers són els elements més desitjats des del punt de vista energètic.

Les cèl·lules amb un més alt contingut de lípids i menys hidrats de carboni i proteïnes, tenen un alt poder calorífic i produeixen alts rendiments d'olis quan és processat.

7.2.3.2. Eliminació del fòsfor en cultius d'algues

Assimilació:

Com tots els organismes, les microalgues necessiten fòsfor per créixer. El fòsfor és usat a les cèl·lules principalment per la producció de fosfolípids, ATP i àcids nucleics.

Les microalgues assimilen el fòsfor com ortofosfat inorgànic, preferentment com H_2PO_4^- o HPO_4^{2-} , essent un procés actiu, és a dir que requereix energia. El fosfat orgànic pot ser convertit a ortofosfat per mitjà de fosfatases a la superfície de la cèl·lula, en un procés que té lloc especialment quan els ortofosfats es troben en poca quantitat.

A més a més, les microalgues són capaces d'assimilar fòsfor en excés, que és emmagatzemat dins les cèl·lules en forma de grànuls de polifosfat. Aquestes reserves poden ser suficients per períodes prolongats de creixement en absència de fòsfor disponible.

El creixement d'una microalga per tant, no pot respondre immediatament als canvis en la concentració externa de fòsfor, a diferència de les respostes immediates a la temperatura i a la llum. Per tant, una alga cultivada en unes aigües contindrà més quantitat de fòsfor de la que realment necessitarà per créixer.

Per tal de maximitzar l'assimilació del fòsfor, és important optimitzar les condicions de creixement ja que l'assimilació del fòsfor depèn generalment de l'assimilació de carboni per l'alga, i per tant del creixement de l'alga.

Precipitació:

Durant la fotosíntesis de les microalgues, aquestes agafen el carboni inorgànic de l'aigua. Les espècies de carboni normalment usades per les microalgues són el diòxid de carboni i el bicarbonat, que requereix l'enzim anhidrasa carbònic per convertir-lo a CO_2 . Quan el bicarbonat és usat com a font de carboni, el pH del medi creix degut a la reacció:



Aquest increment del pH, que pot arribar a ser per sobre 11 en cultius de microalgues, pot afectar fortament la química dins del reactor. Conseqüentment, el fòsfor pot precipitar amb cations disponibles per formar fosfats metàl·lics, el més comú dels quals és el

fosfat de calci. Pel fet que el fòsfor pot formar complexos amb ions metàl·lics, provocarà que no tot el fòsfor estigui disponible. Per això han d'estar en un excés significatiu.

Una major assimilació de fòsfor està directament relacionada amb una major producció de biomassa, que alhora requereix més carboni inorgànic. Un increment del pH indueix a una major precipitació química del fòsfor, i quant més gran és, més precipitació hi ha.

A banda de valors alts de pH, el fosfat de calci ($K_{ps} = 1 \cdot 10^{-25}$) també pot precipitar per increments de la temperatura o per altes concentracions de calci i fòsfor. La precipitació en aigües residuals també és possible en valors de pH neutres, però llavors la concentració de fosfat ha de ser com a mínim de 50 mg P L^{-1} i la de calci de 100 mg Ca L^{-1} .

En aigües suaus, per exemple amb una concentració de calci menor de 50 mg Ca L^{-1} , la concentració de fosfat ha de ser encara més alta per induir la precipitació. A concentracions aquoses baixes en calci i fosfat, els precipitats de fosfat de calci poden ser redissolts.

El carbonat competeix amb els fosfats en la precipitació del calci, formant CaCO_3 a valors de pH superiors a 8. Com a resultat, la precipitació del fòsfor és inversament proporcional a la concentració de carbonat.

La precipitació química del fòsfor ha de comprendre una part significativa del total d'eliminació del fòsfor a les aigües. Particularment en àrees d'aigües dures, com aquelles amb elevades concentracions de calci i magnesi, aquest efecte es veu clarament pronunciat.

La substància química que esdevé del fòsfor pot ser considerada com un efecte avantatjós en el creixement algal, amb la posterior retirada posterior. Un altre avantatge és que el fang químic produït és més fàcilment extraïble que les cèl·lules flotants degut a la seva tendència a precipitar.

(Font: Larsdotter K.; *Microalgae for phosphorus removal from wastewater in a Nordic climate*. Biotechnology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. (2006). ISBN: 91-7178-288-5).

7.2.3.3. Eliminació del nitrogen en cultius d'algues

L'eliminació del nitrogen en els processos de tractament d'aigües per mitjà de microalgues, és principalment degut a l'assimilació de les cèl·lules de les algues.

El nitrogen és el segon nutrient més important després del carboni, i comprèn més del 10% de la biomassa. Existeix en moltes formes, però generalment els components nitrogenats més assimilats per les microalgues són l'amoni (NH_4^+) i el nitrat (NO_3^-).

El component preferit és l'amoni, i quan aquest està disponible, cap altre forma o font de nitrogen serà assimilada. Tot i això, altes concentracions d'amoni ($> 20 \text{ mg NH}_4^+ \text{ N L}^{-1}$) no són recomanables en combinació amb valors alts de pH ja que les cèl·lules patirien toxicitat per amoni. A més de l'amoni i el nitrat, la urea ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) i el nitrit (NO_2^-) poden ser usats com a fonts de nitrogen, encara que la toxicitat del nitrit a altes concentracions la fa menys convenient.

Els cianobacteris també són capaços d'assimilar els aminoàcids arginina, glutamina i asparagina, i algunes espècies de cianobacteri poden fixar nitrogen gas. De totes les fonts de nitrogen, aquesta és la que demanda més energia i només succeeix en alguns cianobacteris quan cap altre component nitrogenat està disponible suficientment.

Pel tractament d'aigües, l'assimilació del nitrogen ha de ser optimitzada maximitzant el creixement de l'alga. Tot i això, a més de l'assimilació de nitrogen, l'amoni pot ser canviat a l'aire com a conseqüència de l'increment dels valors de pH trobats normalment en cultius algals.

La desnitrificació, que és el procés microbial més important utilitzat en el tractament convencional de l'aigua residual, no és considerat com un procés significant en els cultius d'algues, ja que els alts nivells d'oxigen trobats no promouen aquella reacció.

Per altra banda, les impureses en el gas de SO_x i NO_x no tenen un efecte significatiu en el cultiu. Els NO_x no poden proveir el nitrogen necessari en els cultius. No existeixen diferències entre el creixement de cultiu tractant la mateixa quantitat de CO_2 , però amb presència o sense de NO_x i SO_x .

(Font: Larsdotter K.; *Microalgae for phosphorus removal from wastewater in a Nordic climate*. Biotechnology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. (2006). ISBN: 91-7178-288-5).

7.2.4. Acumulació de lípids per limitació de nutrients

La divisió cel·lular i l'acumulació de clorofil·la succeeix ràpidament en els cultius mentre hi ha presència de nitrogen. Quan aquest s'esgota, s'atura la divisió cel·lular, encara que l'acumulació de biomassa continua durant varis dies. La major proporció de la nova biomassa es compon de lípids i olis emmagatzemats.

L'esgotament de nitrogen provoca un ràpid descens del nivell de clorofil·la A en els cultius, suggerint que les cèl·lules han de metabolitzar clorofil·la durant els períodes d'estrès de nitrogen.

Per exemple, per la producció de biodiesel econòmicament viable, hi ha dos requeriments principals:

- Una eficiència fotosintètica (percentatge de radiació que es converteix en biomassa) de almenys el 18%, i
- Un 60% de lípids a la massa de microalgues.

Com que una elevada producció de lípids està normalment relacionada amb condicions d'estrès (absència de nutrients) que resulta en un descens de l'eficiència fotosintètica i del creixement, les dues condicions (elevat contingut de lípids i elevada productivitat) semblen ser mútuament excloents.

La màxima eficiència energètica succeeix quan el cultiu s'aproxima a l'esgotament de nitrogen. En aquest punt, el cultiu mostra un màxim de densitat de pigments fotosintètics (abans de la degradació de la clorofil·la i després de l'esgotament de nitrogen), però l'energia llumínica que arriba a les cèl·lules disminueix a causa de la major densitat del cultiu. Així, l'eficiència fotosintètica (biomassa produïda per entrada de llum) es maximitza i les cèl·lules pateixen menys danys per fotooxidació degut a la menor exposició a la llum.

Entendre la cinètica d'acumulació dels lípids a les microalgues serà essencial per maximitzar la producció de lípids. Si la falta de nitrogen és usada per l'acumulació de lípids, suggereix que la màxima eficiència fotosintètica respecte la producció de lípids (i possiblement el millor moment per a la recuperació de les cèl·lules productores de lípids) té lloc just després que el nitrogen s'esgoti del cultiu.

Són necessàries més investigacions per entendre el comportament exacte en el creixement de les microalgues, i concretament la concentració i la cinètica dels lípids. Per superar aquesta barrera de maximització de l'eficiència energètica, probablement s'hagi de recórrer a la manipulació genètica per tal d'augmentar l'eficiència fotosintètica o per elevar la síntesi de lípids en les diferents espècies.

S'han dut a terme progressos significatius durant els darrers anys per entendre l'acumulació dels lípids a les microalgues, encara que encara falta molt per descobrir en aquest camp.

Està clar que les cèl·lules poden ser induïdes a acumular quantitats de lípids quan el medi és limitat per un nutrient essencial. L'acumulació de lípids correlaciona amb l'aturada de la divisió cel·lular. Tot i això, el mecanisme actual que provoca l'acumulació és desconegut.

7.2.5. La recuperació de les microalgues

La recuperació és considerada una part problemàtica i cara de la producció industrial de biomassa de microalgues a causa de la baixa densitat de cèl·lules acumulades en els cultius, que és típicament entre 0,3-0,5 g/L en pes sec. Tot i això, en certs casos pot arribar fins a 5 g/L en pes sec. (Font: Bei Wang, Yanqun Li, Nan Wu, Christopher Lan. *CO₂ bio-mitigation using microalgae*. Appl Microbiol Biotechnol (2008) 79:707-718).

Per altra banda, l'òptim per a una conversió industrial és que la biomassa de microalgues contingui almenys 300-400 g/L en pes sec. Això suposa que la suspensió de l'efluent necessita ser concentrat de 100 a 1000 vegades.

Un bon mètode és realitzar la recuperació en dos passos. En el primer pas es fa la collita a l'engròs, que és una operació a gran escala per acumular la biomassa, que augmenta la concentració fins a 100-800 vegades, depenent de la concentració de la biomassa inicial i de la tecnologia utilitzada. El segon pas es tracta de fer un espessiment de la mescla que concentrarà la biomassa encara més, de 10 a 30 vegades.

La **floculació** i la **flotació** són extensament usades per realitzar el primer pas, per tal de separar la gran massa de microalgues. El mecanisme de floculació és per neutralitzar o reduir les càrregues negatives de la superfície cel·lular de les microalgues, per tal d'agregar les cèl·lules en suspensió, que poden ser acumulades amb l'addició de floculant com cations multivalents o polímers catiónics.

Un altre mecanisme de floculació és ajustar el pH del cultiu entre 10 i 10,6 utilitzant NaOH per neutralitzar les càrregues negatives de les superfícies cel·lulars, seguit de l'addició del polímer no iònic Magnafloc LT-25 fins a una concentració final de 0,5 mg/L. (Font: Bei Wang, Yanqun Li, Nan Wu, Christopher Lan. *CO₂ bio-mitigation using microalgae*. Appl Microbiol Biotechnol (2008) 79:707-718).

El mètode de flotació es pot realitzar per mitjà de la dispersió de microbombolles d'aigua. És una tècnica molt atractiva ja que no requereix cap addició de substàncies químiques, resultants en un fang molt net.

El segon pas consisteix en fer un espessiment de la biomassa de microalgues fins a 10-30 vegades. Existeixen tecnologies com la **centrifugació** o **filtració**, les més usades per aquest propòsit.

La centrifugació és un mètode molt eficient, però car. La seva eficiència depèn de les característiques de les cèl·lules, del temps de residència i de la profunditat de l'espai, que pot ser reduïda mitjançant el disseny de la centrífuga. El temps de residència pot ser controlat pel nivell de flux. La recuperació centrífuga de la biomassa és factible per productes d'alt valor ja que pot processar grans volums relativament ràpid, i la biomassa resta totalment retinguda durant la recuperació.

La filtració, que pot operar sota pressió o en el buit, és un mètode preferible quan es tracta de recuperació de microalgues filamentoses relativament llargues.



Recuperació de microalgues per filtració. Font: Chisti Y.; *Biodiesel from microalgae*. *Biotechnology Advances* 25 (2007) 294-306.

Com que en un sistema de tractament d'aigües per a microalgues, gran part dels nutrients acabaran formant part de la biomassa, la recuperació és un punt clau per tal de separar els nutrients i la DBO de l'aigua. Tot i això, com que les microalgues són petites no és fàcil dur-la a terme, representant una bona part del cost del procés de cultiu.

Tot i que la recuperació pot realitzar-se eficaçment per mètodes com la filtració o centrifugació, aquests són mètodes difícils d'implementar i representen un cost més elevat que d'altres mètodes. La sedimentació sense addició de substàncies químiques és el mètode més comú en instal·lacions a escala natural, però és desitjable abans una floculació.

La flotació d'algues unicel·lulars sense floculació també serà molt difícil a causa de la superfície hidròfila de les cèl·lules, on no actuaran les bombolles d'aire.

Algunes microalgues flocculen de forma natural, també anomenat biofloculació. El procés és normalment induït per turbulències i els resultats són la formació de biopolímers per enzims extracel·lulars. Els polímers poden ser produïts inclús per bacteries associades a les cèl·lules algals, però en ambdós casos això porta a canvis de càrrega superficials que alhora causen l'agregació de les cèl·lules.

En particular, algunes espècies de cianobacteris formen floccs de forma espontània. D'altres són capaces de formar vacuoles de gas que les fan acumular a la superfície de l'aigua, facilitant en ambdós casos la recollida de la biomassa.

Pel tractament d'aigües, una ràpida mescla del cultiu i un augment del temps de residència hidràulic és recomanable per una major eficiència en la recuperació de les algues degut a la seva biofloculació. Tot i això, un temps de residència hidràulica massa llarg provoca una major susceptibilitat al creixement de zooplàncton.

(Font: Larsdotter K.; *Microalgae for phosphorus removal from wastewater in a Nordic climate*. Biotechnology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. (2006). ISBN: 91-7178-288-5).

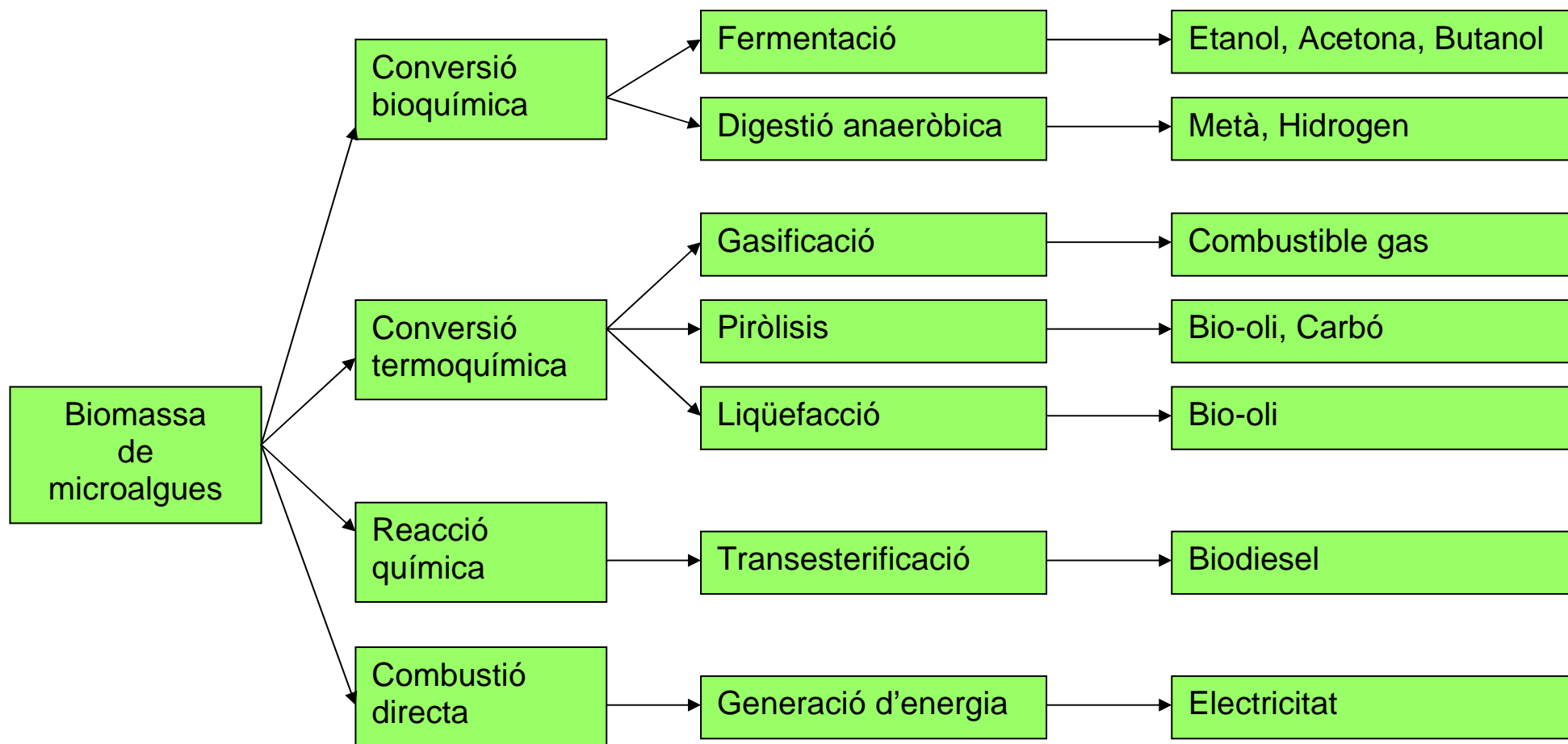
7.3. Producció d'energia

Existeixen múltiples i variades formes per convertir la biomassa de microalgues a diferents tipus d'energia, que poden ser classificades en conversió bioquímica, reacció química, combustió directa i conversió termoquímica. (Font: Bei Wang, Yanqun Li, Nan Wu, Christopher Lan. *CO₂ bio-mitigation using microalgae*. Appl Microbiol Biotechnol (2008) 79:707-718).

En el present estudi s'opta pel procés de combustió directa de la biomassa de microalgues per produir energia o generar electricitat.

Altres mètodes per crear energia són la digestió anaeròbica per produir metà i hidrogen, la fermentació per generar principalment etanol, la gasificació que crea gas combustible, la piròlisis per generar bio-oli o carbó de llenya, la liqüefacció que també genera bio-oli i la transesterificació per produir biodiesel, basada en la extracció dels lípids acumulats a les microalgues.

A continuació es descriu de forma esquemàtica les diferents mètodes en que es pot produir energia a partir de la biomassa:



Font: Bei Wang, Yanqun Li, Nan Wu, Christopher Lan. *CO₂ bio-mitigation using microalgae*. Appl Microbiol Biotechnol (2008) 79:707-718

A continuació es descriuen breument els mètodes que es poden utilitzar per tal de generar productes útils a partir de la biomassa.

(Font: Bei Wang, Yanqun Li, Nan Wu, Christopher Lan. *CO₂ bio-mitigation using microalgae*. Appl Microbiol Biotechnol (2008) 79:707-718).

Gasificació:

És la **conversió de biomassa a combustible gas** mitjançant la oxidació parcial de la biomassa a altes temperatures, típicament en el rang 800-900°C. El gas produït de baix poder calorífic (4-6 MJ N/m³) pot ser cremat directament per calefacció, per generar electricitat o ser usat com a combustible per algunes màquines o turbines de gas.

Piròlisis:

És la **conversió de biomassa seca a fraccions de líquid, sòlid i gas** escalfant la biomassa en absència d'oxigen fins a 500°C. Si el propòsit és maximitzar el rendiment dels productes líquids resultants de la piròlisis, es requereix una temperatura baixa, un nivell de calefacció alt i un temps de residència del gas en el procés curt.

La piròlisis pot ser usada per produir principalment bio-oli, permetent la conversió de la biomassa a bio-cru amb una eficiència fins al 80%.

El bio-oli produït pot entrar en combustió directament en maquinària i turbines per produir energia. Tot i això, els problemes amb la seva pobra estabilitat termal encara necessita ser solucionat.

Liqüefacció:

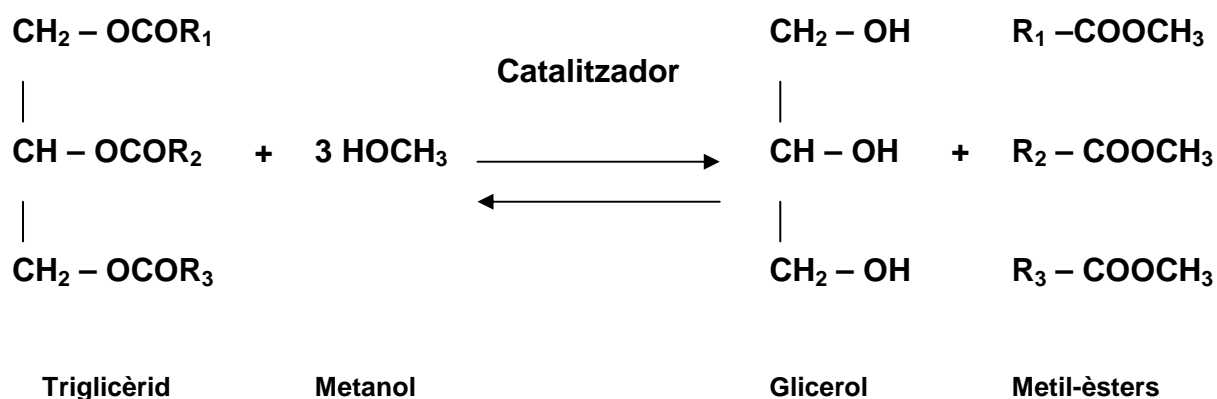
És el **procés per obtenir combustibles líquids** per conversió termoquímica de la biomassa a baixes temperatures i alta pressió usant un catalitzador en presència d'hidrogen.

Té l'avantatge comparant-lo amb la combustió directa, la gasificació convencional i la piròlisis, que pot tractar amb materials humits (contingut d'aigua superior al 60%). Com que no requereix cap procés en sec, les microalgues, que típicament tenen alts continguts d'aigua, són una bona matèria per dur a terme la liqüefacció.

Un desavantatge és que és un mètode car degut a que requereix d'hidrogen, a més a més que és un producte difícil de manejar.

Transesterificació:

És el **procés per obtenir biodiesel**. L'oli primari en la producció de biodiesel consisteix en triglicèrids en els que tres molècules d'àcids grassos són esterificades amb una molècula de glicerol. En la producció de biodiesel, els triglicèrids reaccionen amb el metanol en una reacció coneguda com transesterificació. La transesterificació produeix metilèsters o àcids grassos, que són biodiesel i glicerol. La reacció té lloc de forma gradual: primerament els triglicèrids són convertits a diglicèrids, després a monoglicèrids i finalment a glicerol.



Font: Chisti Y.; *Biodiesel from microalgae*. Biotechnology Advances 25 (2007) 294-306

La transesterificació requereix 3 mols d'alcohol per cada mol de triglicèrids per produir 1 mol de glicerol i 3 mols de metil-èsters. El metanol i l'oli no es barregen, doncs la mescla de la reacció té dues fases.

També poden ser usats altres alcohols, però el metanol és el més barat. El procés està catalitzat per àcids, alcalins i enzims lipases. La transesterificació amb catàlisi alcalina és 4000 vegades més ràpida que la reacció catalitzada per àcids.

Per prevenir les pèrdues en la producció a causa de les reaccions de saponificació, l'oli i l'alcohol han de ser secs. A més a més, l'oli hauria de tenir un mínim d'àcids grassos lliures. El biodiesel és recuperat per rentats periòdics amb aigua per eliminar el glicerol i el metanol.

Si es vol destinar la microalga a la producció de biodiesel, cal que aquesta tingui un alt poder calorífic. Les microalgues desenvolupades en un medi amb unes condicions normals, han demostrat uns poders calorífics entre 18 i 21 Kg/g, que pot veure's incrementat optimitzant les condicions de cultiu.

Alguns estudis han demostrat que el poder calorífic de la biomassa de microalgues pot ser augmentat mitjançant un cultiu de condicions en que el nitrogen és limitant. (Font: Chisti Y.; *Biodiesel from microalgae*. *Biotechnology Advances* 25 (2007) 294-306).

Comparació d'algunes fonts de biodiesel als EUA:

Recuperació	Producció oli L / ha	Àrea cultiu M ha
Gra	172	1540
Soja	446	594
Coco	2689	99
Oli de palma	5950	45
Microalga 1	136900	2
Microalga 2	58700	4.5

Microalga 1: 70% oli (en pes) a la biomassa.

Microalga 2: 30% oli (en pes) a la biomassa.

Font: Chisti Y.; *Biodiesel from microalgae*. *Biotechnology Advances* 25 (2007) 294-306

Utilitzant la mitjana de producció d'oli per hectàrea d'algunes collites, es calcula l'àrea de cultiu necessària per satisfer el 50% de les necessitats de combustibles pels transports dels EUA (Àrea cultiu).

Si l'oli de palma, un cultiu d'oli de gran productivitat, pogués ser cultivat a tot els EUA, es necessitaria el 24% de la seva superfície per satisfer la meitat de les necessitats de combustible pels transports dels EUA. Per tant, els cultius d'oli són clarament ineficients per contribuir a reemplaçar el petroli.

L'escenari canvia radicalment si ens fixem en les microalgues. Només entre 1-3% de superfície de cultiu seria necessària per satisfer el 50% de la demanda de combustible pels transports dels EUA.

Al contrari que les collites per produir l'oli, les microalgues creixen extremadament ràpid i moltes són extraordinàriament riques en olis. Les microalgues poden arribar a doblar la seva biomassa en 24 hores.

Contingut d'oli en algunes microalgues:

Microalga	Contingut d'oli (% pes sec)
Botryococcus braunii	25-75
<i>Chlorella</i> sp.	28-32
Cryptocodinium cohnii	20
Cylindrotheca sp.	16-37
Dunaliella primolecta	23
Isochrysis sp.	25-33
Monallanthus salina	>20
Nannochloris sp.	20-35
Nannochloropsis sp.	31-68
Neochloris oleoabundans	35-54
Nitzschia sp.	45-47
Phaeodactylum tricornutum	20-30
Schizochytrium sp.	50-77
Tetraselmis sueica	15-23

Font: Chisti Y.; *Biodiesel from microalgae*. Biotechnology Advances 25 (2007) 294-306

La productivitat d'oli, que és la massa d'oli produïda per unitat de volum de biomassa cada dia, depèn del nivell de creixement de la microalga i del seu contingut d'oli. Així, **les microalgues amb un elevat contingut d'olis són les més desitjades per produir biodiesel.**

Depenent de les espècies, les microalgues poden produir diferents tipus de lípids, hidrocarburs i altres complexos d'olis. No tots els olis de les microalgues són satisfactoris per fer biodiesel, com és el cas de la *Chlorella* sp., que es veuria afavorida essent utilitzada d'una altra forma per produir energia, com en el nostre cas per generar energia elèctrica.

7.4. Aplicacions en l'alimentació

La *Chlorella sp.* pot servir com una font potencial d'aliment i energia degut a la seva eficiència fotosintètica. És una atractiva font alimentària per la seva alta proporció de proteïnes i altres nutrients essencials pels humans.

En sec, conté aproximadament un 55% de proteïna, 16% grassa, 17% carbohidrats, 4% fibra i 8% de minerals i vitamines. I també és considerat per alguns un aliment fonamental per contenir els anomenats *factors de creixement* de la *Chlorella sp.*

A més, també per les seves innegables propietats terapèutiques per estimular el creixement i la regeneració cel·lular, enfortir el sistema immunològic, protegir dels radicals lliures, millorar la digestió i la que és la seva millor virtut, desintoxicar l'organisme de metalls pesats, dioxines, quimioteràpics, etc.

Proteïnes:

La *Chlorella sp.* posseeix proporcionalment més proteïna que la soja, la tonyina o la carn de vaca. Així, per exemple, per cada 100 grams de carn de vaca, 20 grams aproximadament són proteïnes, mentre que la *Chlorella sp.* té un 45% de proteïnes.

Les proteïnes es componen d'aminoàcids, i d'aquests la *Chlorella sp.* en conté 18 de diferents, incloent a tots els anomenats aminoàcids essencials, el que la converteix en una font de proteïna completa i d'alta qualitat.

Els aminoàcids que la componen formen part -en diferents combinacions- de l'estructura del cervell i altres òrgans, músculs, neurotransmissors, sang, col·lagen, hormones, enzims, etc.

Ingerir quantitats suficients de proteïnes es fonamental per mantenir una bona salut i evitar, per exemple la falta d'energia, el cansament, la pèrdua d'elasticitat de la pell, dolors ossis, etc.

Així doncs, des de finals de la dècada de 1930, es sap que la *Chlorella sp.* conté gran quantitat de proteïnes d'alta qualitat biològica, essent el seu contingut proteic molt més gran que el de la soja, la tonyina o la carn de vaca, exemples reconeguts d'aliments rics en proteïnes. Alguns països com el Japó ja han inclòs la *Chlorella sp.* en la seva dieta habitual, essent consumida per milions de persones.

Clorofil·la:

Cada vegada més experts coincideixen en assenyalar que les causes de moltes malalties s'expliquen per la infinitat de substàncies tòxiques, pesticides, dioxines, radiacions, metalls pesats, etc., que contaminen l'entorn i acaben enverinant el nostre organisme.

I per evitar l'absorció de tals substàncies, prevenir els seus efectes i promoure la seva ràpida i efectiva expulsió fora del cos, el més oportú és prendre aliments que siguin rics en clorofil·la.

Doncs, la microalga *Chlorella sp.* és l'organisme amb major concentració coneguda d'aquesta substància, amb una concentració entre 5-10 vegades més gran que qualsevol altre aliment.

A més, la clorofil·la -molt rica en carotenoides- és l'únic sistema natural existent que a través de l'alimentació pot transmetre a l'ésser humà l'energia procedent del sol.

Nutrients:

Una propietat molt particular de l'alga *Chlorella sp.* és el seu fitonutrient anomenat CGF (*Chlorella Growth Factor* - Factor de Creixement de la *Chlorella sp.*). El CGF és un compost d'àcids nucleics (ADN/ARN), aminoàcids, pèptids, polisacàrids i betaglucans que es troba en el nucli de la cèl·lula de la *Chlorella sp.* El CGF és la substància que els científics consideren que ha jugat un paper essencial, a part de la dura paret cel·lular de la *Chlorella sp.*, en la increïble capacitat de supervivència i immutabilitat d'aquesta alga des de fa 540 milions d'anys.

Vitamines i minerals:

La *Chlorella sp.* conté unes quantitats molt significatives de vitamina C, β -caroté (provitamina A), vitamines B1 (tiamina), B2 (riboflavina), B3 (niacina), B5 (àcid pantotènic), B6 (piridoxina), B9 (àcid fòlic) i B12, vitamines E, H (biotina) i K, colina, inositol i àcid paraaminobenzoic.

Pel que fa als minerals, la seva composició inclou fòsfor, potassi, magnesi, zinc, ferro, calci, manganès, coure, iode i cobalt. Alguns estudis científics han revelat que la *Chlorella sp.* conté més β -caroté, vitamina B1, àcid fòlic i calci que els espinacs, el bròquil o la pastanaga.

Àcids grassos:

El 80% dels que conté l'alga són de tipus insaturat, i per tant beneficiosos per la salut. A més de proteïnes, vitamines, minerals, clorofil·la i àcids grassos, hi ha un fitonutrient que només es troba a la *Chlorella pirenopidosa*.

Es tracta dels *factors de creixement de la Chlorella*, un complex d'àcids nucleics i aminoàcids que accelera el creixement de les pròpies cèl·lules de l'alga i al que es considera un element imprescindible per mantenir la planta viva i sana. Aquests factors s'encarreguen de produir noves cèl·lules de *Chlorella sp.* durant el seu procés de creixement i reproducció.

Al respecte, mentre altres plantes es reproduïxen per fissió binària, aquesta alga es divideix en quatre noves cèl·lules cada 16 o 24 hores, gràcies a aquests *factors de creixement*.

Beneficis en l'organisme:

Ajuda a créixer, desintoxica i estimula les defenses...

Els primers estudis sobre la *Chlorella sp.* es van iniciar fa més d'un segle i des de llavors el seu número s'ha multiplicat, especialment a partir de la dècada dels 60 del segle passat quan van començar a publicar-se els resultats que portarien a considerar-la un aliment realment saludable.

En l'actualitat es considera provada la seva utilitat en la prevenció i/o tractament de malalties. Els experts destaquen les següents propietats:

➤ Estimula el creixement:

Fa més de 50 anys, un científic del Centre d'Investigacions Científiques de Tokio, el Dr. Fujimaki, va aconseguir aïllar de la *Chlorella sp.* una substància rica en àcids nucleics a la que va anomenar *factor de creixement de la Chlorella*, ja que va comprovar que es tractava d'una substància físicament activa que afavoria el creixement de la pròpia planta.

Així que va decidir provar-la al laboratori amb rates, conills i pollastres observant que al cap d'un temps el seu pes i mida es duplicaven respecte als animals del grup control.

El següent pas va ser provar-ho en nens i els resultats varen ser similars. A més d'afavorir el creixement infantil, es comprovà després que l'alt contingut en àcids nucleics enforteix el sistema immunològic i ajuda a l'organisme a recobrar l'energia, rejuvenir la pell, etc.

➤ **Potencia el sistema immunològic:**

Nombrosos experiments -duts a terme als EUA i Japó- demostren que l'alga estimula la formació de cèl·lules defensives i la producció de glòbuls vermells. En concret afavoreix la producció de limfòcits T i B encarregats de destruir bacteries, virus, fongs i altres microorganismes patògens.

➤ **Protegeix contra els radicals lliures:**

A més de comportar-se directament com un antioxidant i eliminar els radicals lliures que podrien generar greus danys a l'organisme, el β -caroté que conté aquesta alga té la capacitat de dissipar l'energia de l'oxigen per impedir així que es generin més radicals lliures.

De fet, existeix una més que evident relació inversa entre alguns tipus de càncer i la ingestió de β -caroté. La resta de substàncies antioxidants que conté -com les vitamines C i E- ajuden a potenciar aquesta tasca protectora.

➤ **Millora el funcionament de l'aparell digestiu:**

Millora la funció estomacal i el peristaltisme intestinal -que ajuda a combatre l'estrenyiment- i estimula el creixement a l'intestí de bacteries aeròbiques beneficioses promovent d'aquesta forma la salut de tot l'organisme ja que les mateixes combaten infeccions, neutralitzen els efectes de substàncies tòxiques o potencialment nocives i fabriquen part de la vitamina B12 que el nostre cos necessita.

➤ **Desintoxica l'organisme:**

A més d'estimular entre d'altres la formació de glòbuls vermells, tonificar la sang, millorar la respiració, participar en el bon funcionament del sistema hormonal, accelerar el procés de curació de ferides i cremades i reforçar el sistema immunològic, l'alga també té la propietat de depurar i desintoxicar el cos de metalls pesats com cadmi, urani, mercuri o plom i de dioxines, pesticides, herbicides, quimioteràpics, radiacions, etc.

Aquest extraordinari efecte s'atribueix, per un costat, a la clorofil·la que conté i per altre, a la singular estructura de la seva membrana cel·lular, de la qual la capa més externa (en té tres) està formada per una substància carotenoide polimeritzada que arriba a absorbir i emmagatzemar l'element tòxic per després eliminar-lo del cos.

A més s'ha comprovat que...

- Protegeix el sistema cardiovascular.
- Purifica la sang.
- Redueix la pressió sanguínia i disminueix la taxa de colesterol dolent.
- Estimula la regeneració de cèl·lules.
- Contribueix a la reparació dels teixits i és un excepcional cicatritzant.
- Augmenta la producció de glòbuls vermells -beneficia a persones amb anèmia-.
- Ajuda al transport d'oxigen a tots els teixits del cos, especialment al cervell.
- Atenua els símptomes de les reaccions al·lèrgiques.
- Mitiga els efectes nocius de la quimio i la radioteràpia.
- És alcalina i ajuda a equilibrar el pH.
- Fomenta el bon funcionament metabòlic general.
- Augmenta el rendiment físic i esportiu. De fet el Comitè Olímpic Internacional (COI) avala que millora les marques obtingudes pels esportistes i redueix el seu temps de recuperació.

7.5. Sistemes de cultiu

Estudis han demostrat que un sistema de cultiu ben dissenyat guia cap a un increment significatiu de l'eficiència en la fixació del CO₂. El disseny de sistemes de cultiu ha de considerar molts factors, incloent la intensitat de la llum, la temperatura, la biologia de la microalga, la naturalesa del producte, la mescla, la aeració i la font de carboni.

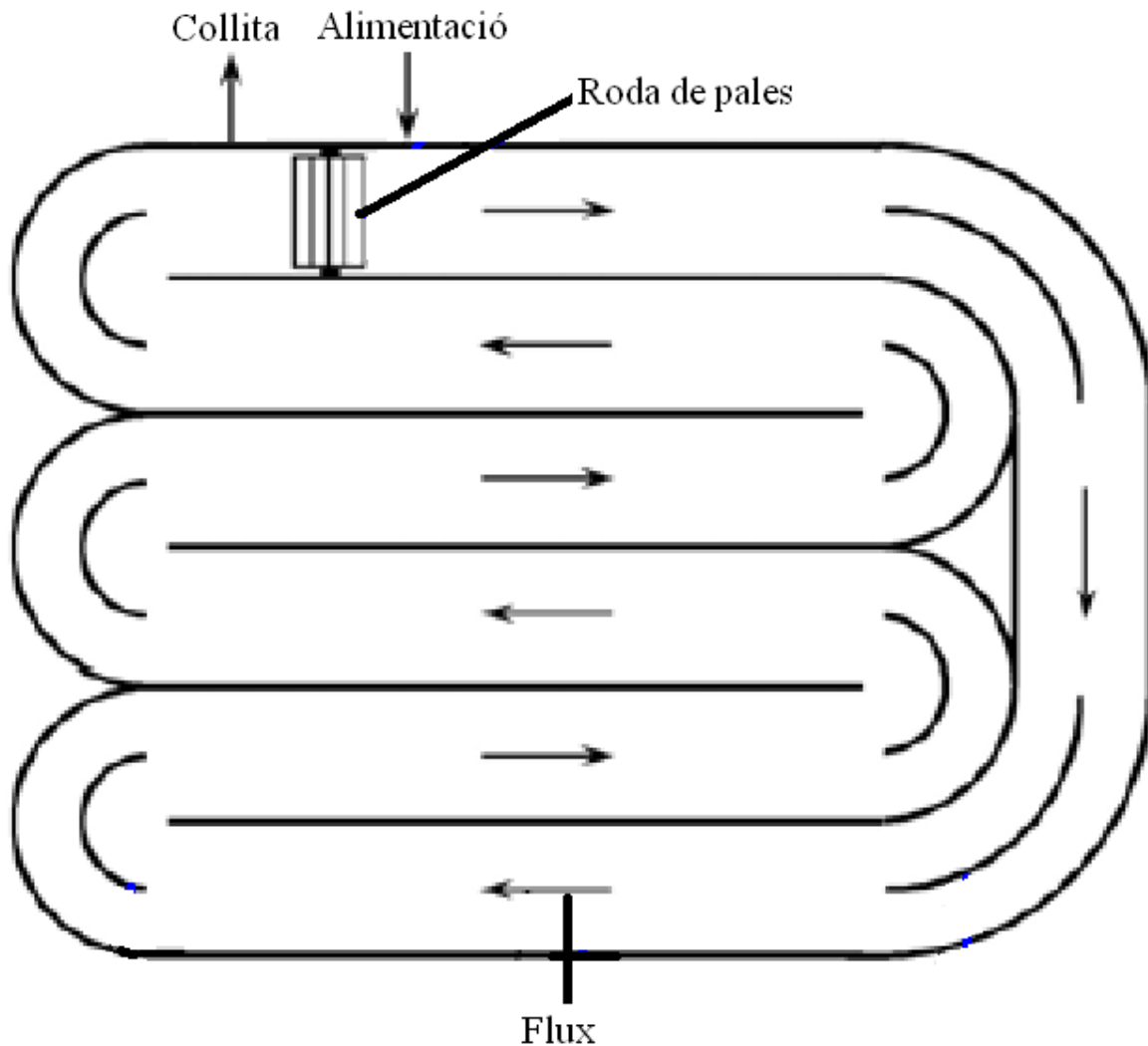
Encara que les microalgues són considerades relativament eficients en la captura de l'energia solar per la producció de components orgànics via fotosíntesis, l'eficiència fotosintètica de les microalgues per la conversió de l'energia solar és típicament inferior al 20%.

Per altra banda, l'augment en la densitat dels cultius redueix la quantitat de llum que li arriba a cada cèl·lula, i per tant es redueix el creixement específic d'aquestes. Per tant, la pobra penetració de llum pot ser el factor limitant més significatiu en el creixement.

Hi ha dos tipus primaris de sistemes de cultiu, els sistemes oberts que tenen una superfície moderada en proporció al volum (3-10 m⁻¹), i els fotobiorreactors, que consten d'una gran superfície en relació al volum (25-125 m⁻¹).

Mentre que els sistemes oberts requereixen un menor cost pel cultiu de microalgues, els fotobiorreactors proporcionen altres avantatges com una gran relació superfície-volum, una major habilitat per prevenir la contaminació o una capacitat per aconseguir una gran densitat i productivitat de biomassa, i per tant un grau de fixació del CO₂ elevat.

(Font: Bei Wang, Yanqun Li, Nan Wu, Christopher Lan. *CO₂ bio-mitigation using microalgae*. Appl Microbiol Biotechnol (2008) 79:707-718).

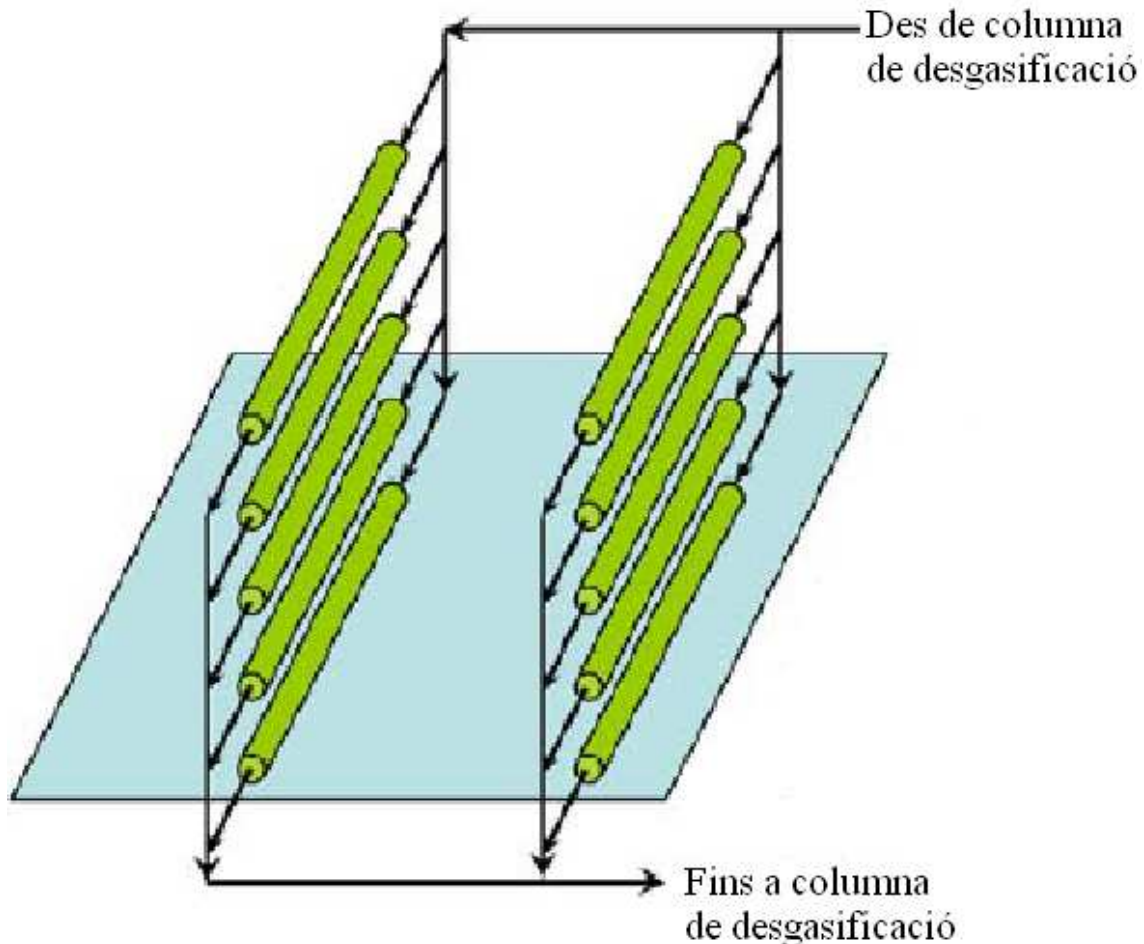


Sistema obert. Font: Chisti Y.; *Biodiesel from microalgae*. *Biotechnology Advances* 25 (2007) 294-306

Els fotobiorreactors tenen unes característiques de penetració de la llum més favorables, que fan possible mantenir una biomassa i una producció més gran en un temps de residència hidràulic més petit.

Tot i això, els fotobiorreactors tancats són normalment més sofisticats i requereixen d'unes demandes d'operació més complexes que els sistemes oberts.

El fotobiorreactor tubular, una de les configuracions més populars de fotobiorreactor, inclou una sèrie de tubs transparents utilitzats per captar la llum solar. Tenen un diàmetre de tub relativament petit, generalment de 0,1m o menor, necessari per assegurar una alta productivitat de biomassa. En un emplaçament típic, els tubs són col·locats paral·lelament els uns amb els altres.



Sistema tancat o fotobiorreactor. Font: Chisti Y.; *Biodiesel from microalgae*. Biotechnology Advances 25 (2007) 294-306

En cultius de microalgues limitats per la llum, la densitat de la cèl·lula en un estat estable serà proporcional a la quantitat de fotons capturats durant el temps de residència hidràulic. **La densitat cel·lular per àrea depèn de dos factors:** (Font: Larsdotter K.; *Microalgae for phosphorus removal from wastewater in a Nordic climate*. Biotechnology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. (2006). ISBN: 91-7178-288-5).

➤ **El temps de residència hidràulic.**

Quant més gran és el TRH, més gran és la densitat cel·lular.

➤ **La intensitat de la llum.**

Quant més gran és la intensitat, més gran és la densitat cel·lular (fins a un cert límit, a partir del qual es comença a inhibir el creixement ja que la llum no té tanta incidència en el reactor a causa de la densitat cel·lular). D'alguna manera la

pròpia llum inhibeix el creixement, procés anomenat també fotoinhibició.

Des de que la intensitat de la llum comença a deprimir de forma exponencial en la profunditat de l'aigua, la densitat cel·lular per volum també serà menor a més profunditat. Conseqüentment, per arribar a densos cultius de microalgues, la profunditat o distància des de la superfície és un important paràmetre amb el que treballar.

Com que la concentració de nutrients decreix a mesura que creix la densitat de la biomassa de microalgues, els cultius d'alta densitat són favorables per les perspectives de tractament d'aigües des que s'han de respectar i controlar el límits d'abocament del nitrogen i del fòsfor.

Tot i això, la llum no és sempre completament necessària pel creixement microalgal. Hi ha certes microalgues que són capaces de créixer sense llum, i amb una font de carboni orgànic envers del diòxid de carboni, com ara amb àcids orgànics, sucres, acetat o el glicerol. Tot i això, la llum ha de ser un paràmetre important per buscar la seva optimització.

La producció de biomassa en els cultius de microalgues es fa de forma contínua durant les hores de sol o de dia. Però a les hores de foscor, fins al 25% de la biomassa produïda pot arribar a perdre's a causa de la respiració. La magnitud d'aquestes pèrdues està lligada al nivell de llum i temperatura presents mentre creix la biomassa, i a la temperatura en les hores de foscor.

7.5.1. Comparació reactor tubular – sistemes oberts

En la següent taula es compara la producció de biomassa de microalgues, produïda per un fotobiorreactor i per un sistema obert. Aquesta comparació és per una producció anual de 100 tones de biomassa en ambdós casos. (Font: Chisti Y.; *Biodiesel from microalgae*. Biotechnology Advances 25 (2007) 294-306).

Els dos models consumeixen una quantitat idèntica de diòxid de carboni si les pèrdues a l'atmosfera són menyspreades. Els models de producció són comparats per combinacions òptimes de producció i concentració de biomassa que han estat obtinguts en experiments de fotobiorreactors i sistemes oberts a gran escala.

Variable	Fotobiorreactor	Sistema obert
Producció anual de biomassa (Tones)	100	100
Productivitat volumètrica (Kg/m ³ dia)	1.535	0.117
Productivitat superficial (Kg/m ² dia)	0.048	0.035
Concentració de la biomassa en el cultiu (Kg/m ³)	4.00	0.14
Nivell dilució (dies ⁻¹)	0.384	0.250
Àrea necessària (m ²)	5681	7828
Producció oli (m ³ /ha) (70 % en biomassa)	136.9	99.4
Producció oli (m ³ /ha) (30 % en biomassa)	58.7	42.6
Consum anual CO ₂ (Kg)	183.333	183.333
Geometria del sistema	132 tubs paral·lels/ unitat Llargada tubs: 80m Diàmetre tubs: 0.06 m	978 m ² / bassa Amplada bassa: 12 m Llargada bassa: 82 m Profunditat bassa: 0.3 m
Nombre unitats	6	8

Font: Chisti Y.; *Biodiesel from microalgae*. Biotechnology Advances 25 (2007) 294-306

Els fotobiorreactors suposen una molt més gran producció d'oli per hectàrea comparat amb els sistemes oberts. Això és degut a que la producció de biomassa volumètrica del fotobiorreactor és 13 vegades més gran en comparació amb els sistemes oberts.

Els dos models de producció són tècnicament viables, doncs ja s'han utilitzat fotobiorreactors i sistemes oberts de dimensions similars a les indicades a la taula per operacions comercials.

La recuperació de la biomassa de microalgues en el caldo és necessària per extreure l'oli. La biomassa és fàcilment recuperable per filtració o centrifugació, entre d'altres mètodes. El cost per la seva recuperació pot ser significatiu.

La recuperació en el cultiu del fotobiorreactor costa només una fracció del cost de recuperació de la biomassa produïda en un sistema obert. Això s'explica ja que la concentració de biomassa típica que és produïda en un fotobiorreactor és aproximadament 30 vegades la que s'obté en un sistema obert. A més, es necessita menys volum de cultiu en el fotobiorreactor per obtenir una mateixa quantitat de biomassa.

El fotobiorreactor tubular més simple ja suposa uns costos de capital aproximadament 10 vegades superior als sistemes oberts. Però evidentment, els sistemes tubulars tancats també ho compensen amb d'altres avantatges:

- Seguretat enfront a la contaminació d'altres organismes que poden ser transportats pel vent.
- Millor control sobre les condicions mediambientals (pH, temperatura) i contaminants biològics.
- Concentracions cel·lulars més elevades.
- Reducció dels costos de recuperació.

A més, seria possible fer créixer algues incapaces de dominar en sistemes oberts.

7.5.2. El fotobiorreactor tubular

7.5.2.1. L'estructura del reactor

El fotobiorreactor tubular consisteix en una sèrie de tubs transparents, normalment elaborats amb plàstic o vidre. Aquesta sèrie de tubs, o col·lector solar, és on es captura la llum del sol.

Generalment, tenen un diàmetre de 0.1m o menor. El diàmetre del tub està limitat perquè la llum no penetri prou en profunditat dins la biomassa com per assegurar una alta productivitat de biomassa en el fotobiorreactor.

Els tubs o col·lectors solars són orientats per tal de maximitzar la captura de llum solar. En un emplaçament típic, els tubs són disposats paral·lelament entre sí i planers sobre el terra. Els tubs col·locats paral·lelament en horitzontal són disposats sovint en forma de tanca, per tal d'incrementar el nombre de tubs que poden cabre en una àrea donada.

El sòl de sota els tubs és normalment pintat de color blanc o recobert amb plàstics, per tal d'augmentar la reflectància o albedo. Així, un reflex més gran en el sòl, suposa una major recepció llumínica en els tubs.

La il·luminació artificial dels fotobiorreactors tubulars és una tècnica factible, però cara en comparació amb la disposició de llum natural. Tot i això, la llum artificial s'ha usat en algunes produccions de biomassa a gran escala, particularment per substàncies d'alt valor.

7.5.2.2. Els gasos en el reactor

La sedimentació dins els tubs és previnguda mantenint un flux turbulent, que és produït mitjançant una bomba mecànica o una bomba d'aire. Les bombes mecàniques poden danyar la biomassa, però són més fàcils de dissenyar, construir i operar que les bombes d'aire. A més a més, les bombes d'aire són menys flexibles que les mecàniques, i requereixen d'una aportació d'aire per treballar.

Quan es subministra un gas, en aquest cas CO₂, des de la part inferior d'un tub inclinat, la bombolla de gas viatjarà per la banda interior d'aquest fregant la superfície superior interna del tub. Això provocarà una renovació de la capa de líquid de la zona superior

interior del tub, dificultant així l'adherència de l'alga i evitant l'embrutiment. Ja que aquesta superfície és normalment utilitzada pel pas o penetració de la llum en el reactor, aquest sistema d'autoneteja pot reduir enormement els requeriments de manteniment. (Font: Vunjak-Novakovic G., Kim Y., Wu X., Berzin I., Merechuk J.C.; *Air-lift bioreactors for algal growth on flue gas: mathematical modeling and pilot-plant studies*. Ind. Eng. Chem. Res. (2005) 44: 6154-6163).

La fotosíntesis genera oxigen. Sota una gran irradiació, el màxim nivell de generació d'oxigen en un fotobiorreactor tubular típic és de l'ordre de $10 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3}$. **Uns nivells d'oxigen dissolt molt més alts que els valors de saturació de l'aire inhibeix la fotosíntesis.** A més, una alta concentració d'oxigen dissolt en combinació amb una gran intensitat de llum produeix danys de fotooxidació a les cèl·lules.

Per prevenir la inhibició i els danys, el nivell màxim tolerable d'oxigen dissolt no hauria d'excedir els voltants del 400% del valor de l'aire de saturació. És a dir, la concentració d'oxigen a l'aigua només pot sobrepassar per quatre vegades la seva concentració de saturació.

La llei de Henry explica la relació entre la quantitat d'un gas dissolt en un líquid i la pressió parcial que aquest exerceix. És a dir, a una temperatura constant, la quantitat de gas dissolta en un líquid és directament proporcional a la pressió parcial que exerceix aquest gas sobre el líquid:

$$c = k \cdot p$$

on:

p = pressió parcial del gas.

c = concentració del gas en el líquid.

K = constant de Henry, que depèn de la naturalesa del gas, la temperatura i el líquid.

L'oxigen no pot ser eliminat dins un fotobiorreactor tubular. Això limita la llargada màxima d'un tub continu abans que l'eliminació de l'oxigen esdevingui necessària.

El cultiu ha de constar de zones periòdiques de desgasament on es bombejarà aire per eliminar l'oxigen. Típicament, un tub continu no pot excedir els 80m, tot i que depèn de molts factors incloent la concentració de la biomassa, la intensitat de la llum, el nivell de flux i la concentració d'oxigen a l'entrada del tub.

A més a més d'eliminar l'oxigen dissolt acumulat, la zona de desgasament també ha de separar l'aire resultant del bombolleig del caldo de microalgues. Com que la zona de desgasament és més profunda comparada amb els tubs, provoca que la il·luminació sigui pobra, i per tant, el seu volum ha de ser petit en relació al volum dels tubs o col·lectors solars.

Com que el brou de microalgues evoluciona al llarg del tub, el pH augmenta degut al consum de diòxid de carboni. **Cada certa distància de col·lector solar, aquest s'ha d'alimentar amb CO₂ per tal de prevenir la limitació del mateix gas i un excés en el creixement del pH.**

7.5.2.3. La temperatura en el reactor

Els fotobiorreactors poden requerir refrigeració durant les hores de llum diürnes. A més, és útil realitzar un control de la temperatura durant la nit. Per exemple, les pèrdues de biomassa durant la nit a causa de la respiració pot ser reduïda abaixant la temperatura. El sistema de refrigeració dels fotobiorreactors tubulars exteriors són efectius.

Tot i l'augment en el coneixement de l'enginyeria d'operació i funcionament dels fotobiorreactors tubulars, encara es mantenen alguns problemes.

7.5.2.4. La llum en el reactor

Com moltes plantes, les algues converteixen el CO₂ a material orgànic per mitjà de reaccions fotosintètiques. Els electrons per aquesta reacció de reducció provenen en última instància de l'aigua, que és convertida a oxigen i protons. L'energia d'aquest procés és obtinguda de la llum, que és absorbida pels pigments, principalment clorofil·la i carotenoides.

La fotosíntesi és un procés dividit en dues etapes. La fase I ("reaccions de llum") és dependent de la llum i requereix de l'energia llumínica per formar molècules que transportin aquesta energia, que seran usades en la segona etapa. La fase II ("reaccions de foscor") és independent de la llum i succeeix quan els productes de la fase I són usats per formar enllaços C-C covalents de carbohidrats. (Font: Vunjak-Novakovic G., Kim Y., Wu X., Berzin I., Merechuk J.C.; *Air-lift*

bioreactors for algal growth on flue gas: mathematical modeling and pilot-plant studies. Ind. Eng. Chem. Res. (2005) 44: 6154-6163).

El flux de llum decreix exponencialment amb la distància des de la superfície irradiada. Les microalgues properes a la font d'irradiació estan més exposades a una alta densitat de fotons, que provoca una major velocitat de creixement, comparant amb les cèl·lules del centre del tub, que reben menys llum i per tant, creixen més lentament.

Tot i això, una llum excessiva pot danyar la proteïna D1 (fotoinhibició) i disminuir la velocitat de creixement. Per tant, la velocitat de creixement pot ser influenciada, no només per la intensitat de la il·luminació, sinó també per canvis periòdics d'aquesta, fent augmentar el creixement de les microalgues.

Els fotobiorreactors tubulars que operen amb una alta densitat de cultiu per obtenir una alta productivitat, inevitablement contenen una zona central fosca limitada a la llum i una zona perimetral amb més incidència llumínica. La intensitat de la llum a la zona on la llum és limitada és menor que el nivell de saturació llumínica.

La màxima eficiència ronda aproximadament el 10% de la llum solar total. Tot i això, les altes conversions de llum solar són observades només a intensitats de llum baixes. Sota una llum intensa, només una tercera part d'aquesta màxima eficiència es tradueix a biomassa, a causa de l'efecte de saturació de la llum. Per sobre del 10% la llum és malgastada. De fet, grans intensitats de llum poden danyar l'aparell fotosintètic, fenomen conegut com fotoinhibició.

7.5.2.5. La dinàmica del fluid

Les turbulències dins el tub causen un ràpid cicle de moviment del fluid entre la zona de llum i la zona de foscor. La freqüència del cicle llum-foscor depèn de molts factors, incloent la intensitat de la turbulència, la concentració de les cèl·lules, les propietats òptiques del cultiu, el diàmetre del tub i el nivell exterior d'irradiació.

Els períodes d'alternança entre el cicle de llum-foscor per tal d'obtenir un rendiment màxim encara no s'ha resolt.

Del que sí es té coneixement és de la influència de la turbulència, que redueix la fotoinhibició i la fotolimitació assegurant que les cèl·lules

no resideixen contínuament en zones de llum o foscó per llargs períodes.

En principi, els mescladors immòbils instal·lats a la part interior del tub serveixen per millorar la mescla entre les zones perifèriques i centrals del tub. Desafortunadament però, alguns dels mescladors dissenyats fins al moment no són prou satisfactoris pels fotobiorreactors ja que redueixen considerablement la penetració de la llum.

Així com passa a les cèl·lules de plantes superiors i animals, les microalgues també són danyades per una hidrodinàmica massa intensa, com passa en els fluxos de gran velocitat. Per tant, la turbulència generada en els reactors, per tal de generar un cicle òptim llum–foscó, és difícil d’aconseguir sense produir un dany a les cèl·lules de les microalgues.

7.6. Càlcul de la radiació solar

Paràmetres per calcular l'energia solar:

La radiació total que arriba a una unitat de superfície exposada perpendicularment, considerant-la fora de l'atmosfera i a una distància mitjana del Sol de 1 U.A. és una constant anomenada *constant solar extraterrestre*.

$$I_{cs} = 1353 \pm 20 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Si tenim en compte que l'òrbita de la Terra al voltant del Sol té una petita excentricitat, la radiació solar que arriba a la superfície varia al llarg de l'any, on n és el dia de l'any comptat des de l'1 de gener, l'equació és:

$$I_e(n) = I_{cs} \left[1 + 0,034 * \cos\left(\frac{360 * n}{365}\right) \right] \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

La posició d'un punt a la Terra respecte al Sol ve donada per la latitud (ϕ), l'època de l'any; la declinació solar (δ) i el moment del dia, representat per l'angle horari (ω).

Declinació solar (δ):

L'eix de rotació terrestre al voltant del qual gira la Terra, forma un angle de $23,45^\circ$ amb la normal al pla orbital. Per tant, l'angle entre l'equador de la Terra i el pla orbital marcat per la línia que uneix els centres de la Terra i el Sol, està canviant permanentment al llarg de l'any, entre $+23,45^\circ$ i $-23,45^\circ$.

L'angle en un moment determinat és la declinació solar. En un sol dia la declinació pot variar com a màxim $0,5^\circ$, però per facilitar el càlculs es considera constant per cada dia de l'any.

$$\delta = 23,5^\circ * \sin\left[\frac{360^\circ}{365^\circ} (284 + n)\right]$$

Angle horari (ω):

És l'angle que forma el meridià celeste amb el cercle horari que passa pel Sol. Es defineix com a valor 0 al migdia solar local. Augmenta 15° per cada hora que falta per arribar al migdia solar i disminueix 15° cada hora que passi del migdia solar.

Altitud solar (α_s):

És l'angle que formen la direcció del Sol i el pla horitzontal definit en un punt de la superfície terrestre. El seu complementari és l'anomenat **zenit solar** (ζ_s).

En el moment de la sortida i posta de sol tenim que $\alpha_s = 0$, i per tant, podem determinar que l'angle de sortida o posta del Sol serà:

$$\omega_{SP} = \arccos(-\operatorname{tg}\phi * \operatorname{tg}\delta)$$

El moment on l'altitud solar és màxima ve determinat per:

$$\alpha_s = \arcsin(\sin\phi * \sin\delta + \cos\phi * \cos\delta)$$

Azimut solar (γ_s):

És l'angle que formen el pla vertical que conté el Sol i la línia coincident amb el meridià local, en direcció nord-sud terrestre. Es consideren valors negatius de l'azimut cap a l'Est i positius cap a l'Oest.

Mitjana mensual de radiació diària solar extraterrestre:

La quantitat d'energia extraterrestre (H_e) sobre una superfície horitzontal en un punt, pel dia de l'any n . Si integrem aquesta quantitat d'energia entre el moment de sortida (t_s) i el moment de la posta (t_p) del Sol, tenim la radiació mitjana diària ($\overline{H_e}$):

$$\overline{H_e} = \int_{t_s}^{t_p} H_e = \frac{86400}{\pi} * I_e * \left(\cos \phi * \cos \delta * \sin \omega_{SP} + \frac{\pi * \omega_{SP}}{180} * \sin \phi * \sin \delta \right) \quad [J/m^2 * dia]$$

Per efectuar els càlculs tenim en compte la latitud de Girona, considerant-la com $\phi=42^\circ$ Nord. Per calcular la mitjana mensual considerem uns dies, aproximadament a la meitat del mes, com a mitjana global per cada dia del mes.

Així doncs obtenim:

Mes (dia)	Dia de l'any	δ ($^\circ$)	ω_{sp} ($^\circ$)	α_s ($^\circ$) Màx.	I_e (J/s·m ²)	H_e (J/s·m ²)	$\overline{H_e}$ (KJ/m ² ·dia)
Gener (17)	17	-20,96	70,28	27,66	1397,05	648,51	14197,33
Febrer (16)	47	-12,98	78,28	35,64	1384,75	806,84	19537,78
Març (16)	75	-2,42	87,86	46,20	1365,70	985,66	26528,07
Abril (15)	105	9,43	98,42	58,05	1342,21	1138,94	33899,77
Maig (15)	135	18,83	107,49	67,45	1321,54	1220,52	39167,53
Juny (11)	162	23,14	112,11	71,76	1309,83	1243,98	41335,11
Juliol (17)	198	21,23	110,01	69,85	1308,63	1228,52	40192,94
Agost (16)	228	13,48	102,20	62,10	1320,40	1166,97	35882,14
Setembre (15)	258	2,22	91,96	50,84	1340,68	1039,57	29145,63
Octubre (15)	288	-9,62	81,41	39,00	1364,94	858,50	21314,11
Novembre (14)	318	-18,95	72,39	29,67	1384,75	685,41	15429,56
Desembre (10)	344	-23,10	67,93	25,52	1396,30	601,47	12707,18

Font: elaboració pròpia

Mitjana mensual de radiació solar terrestre sobre un captador en posició horitzontal:

La radiació diària a la superfície de la Terra està lluny dels nivells extraterrestres. L'absorció, la reflexió i la dispersió de la radiació solar extraterrestre per part dels núvols i elements químics en suspensió, transformen part de l'energia directa a energia difusa.

Per exemple, un dia d'estiu clar i ombres ben definides, més del 90% pot ser energia directa, per sobre dels 1000 W/m². En canvi, en dies de nuvolositat apreciable, on la il·luminació és uniforme i per tant, gairebé sense ombres, el baix nivell de radiació directa es compensa parcialment amb radiació difusa, fins arribar a nivells de 400 W/m².

A partir de mesures in situ es pot determinar quina és la mitjana mensual de radiació diària sobre una superfície horitzontal \bar{H} i l'índex de nuvolositat \bar{K}_t , que es relacionen mitjançant:

$$\bar{K}_t = \frac{\bar{H}}{H_e}$$

Per la ciutat de Girona tenim:

Mes	Radiació diària sobre una superfície horitzontal \bar{H} [KJ / m ² dia]	Índex de nuvolositat \bar{K}_t
Gener	7238,00	0,53
Febrer	10204,00	0,53
Març	13624,00	0,51
Abril	15958,00	0,47
Maig	17958,00	0,46
Juny	17070,00	0,41
Juliol	22052,00	0,55
Agost	18058,00	0,55
Setembre	13652,00	0,46
Octubre	10632,00	0,48
Novembre	7400,00	0,48
Desembre	5600,00	0,46

Font: Universitat de Girona

Mitjana mensual de radiació solar terrestre sobre un captador en posició inclinada:

A partir de la radiació solar terrestre sobre un captador horitzontal podem aproximar-ho a un captador inclinat a partir de:

$$\overline{H}_T = \overline{R} * \overline{H}$$

on \overline{R} és el quocient entre la mitjana mensual de radiació diària sobre una superfície del captador i sobre una superfície horitzontal per cada mes, avaluada com a suma de la radiació directa, difusa i reflectida del total de la radiació que arriba a la superfície terrestre.

Així doncs, tenim que:

$$\overline{R} = \left(1 - \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}}\right) * \overline{R}_b + \left(\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}}\right) * \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \rho * \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right)$$

comp. directe
comp. difús
comp. reflectit

ρ és la reflectància del sòl, que pot ser entre 0,2 per superfícies blanquinoses, i 0,7 per superfícies cobertes de neu, i per tant, molt reflectants. Nosaltres hem considerat una reflectància de 0,4.

\overline{H}_d és la mitjana mensual de radiació difusa diària en superfície horitzontal; és difícil de calcular perquè depèn de les condicions meteorològiques i de caràcter irregular. Per tant utilitzem el valor

de $\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}}$, que està correlacionat amb l'índex de nuvolositat, i per tant tenim que:

$$\left(\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}}\right) = 1,39 - 4,027 * \overline{K}_T + 5,531 * \overline{K}_T^2 - 3,108 * \overline{K}_T^3$$

\overline{R}_b és el quocient entre la mitjana mensual de radiació directa sobre una superfície inclinada i una superfície horitzontal per a cada mes, que ve determinat per una funció complexa de la transmitància de l'atmosfera que es pot calcular per a cada mes segons:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi - \beta) * \cos \delta * \sin \omega'_s + (\pi / 180) * \omega'_s * \sin(\phi - \beta) * \sin \delta}{\cos \phi * \cos \delta * \sin \omega_{SP} + (\pi / 180) * \omega_{SP} * \sin \phi * \sin \phi}$$

sent ω'_s l'angle horari corresponent a la posta de Sol per una superfície inclinada, definit com el valor mínim de dos angles: l'angle horari ω_{SP} , i l'angle afectat per la inclinació de la superfície captadora, definit com $\omega'_s = \min[\omega_{SP} * \arccos(-\text{tg}(\phi - \beta) * \text{tg} \delta)]$ i β com l'angle d'inclinació de la superfície respecte l'horitzontal i de cares al sud.

Seguint els resultats de les taules anteriors podem calcular considerant una $\beta = 42^\circ$, és a dir, igualant $\beta = \phi$:

Mes	\bar{H}_e (KJ/d.m ²)	\bar{H}_d / \bar{H}	\bar{R}_b	Comp. directe	Comp. difusa	Comp. reflecti.	\bar{R}	\bar{H}_T (KJ/d.m ²)
Gener	14197,33	0,36	2,39	1,52	0,32	0,05	1,89	13691,56
Febrer	19537,78	0,35	1,87	1,21	0,31	0,05	1,57	15986,78
Març	26528,07	0,36	1,41	0,91	0,31	0,05	1,27	17310,53
Abril	33899,77	0,40	1,07	0,65	0,34	0,05	1,04	16651,99
Maig	39167,53	0,41	0,87	0,52	0,35	0,05	0,92	16590,70
Juny	41335,11	0,45	0,80	0,44	0,39	0,05	0,88	15042,53
Juliol	40192,94	0,33	0,83	0,55	0,29	0,05	0,89	19727,35
Agost	35882,14	0,37	0,98	0,62	0,32	0,05	0,99	17904,55
Setembre	29145,63	0,40	1,26	0,76	0,35	0,05	1,16	15819,58
Octubre	21314,11	0,37	1,70	1,07	0,32	0,05	1,44	15354,57
Novembre	15429,56	0,39	2,24	1,37	0,34	0,05	1,76	13008,19
Desembre	12707,18	0,42	2,58	1,49	0,37	0,05	1,91	10688,75

Font: elaboració pròpia

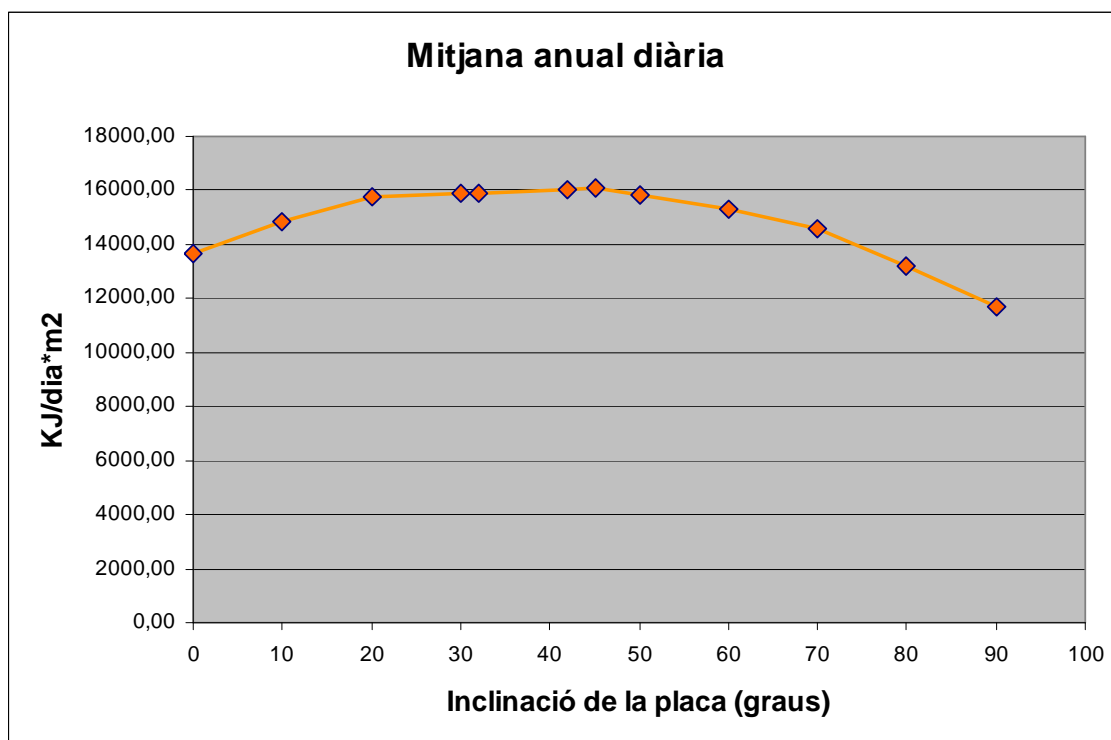
Simulació de la radiació mensual mitjana variant la inclinació de la superfície captadora:

Considerem els resultats anteriors com a un cas concret, ja que no podem assegurar que inclinant la superfície captadora un angle igual a la latitud on es troba sigui el de màxima eficiència.

Primer simulem, per diferents inclinacions de la placa, quina és la mitjana anual diària:

Angle de la placa ϕ	Mitjana (KJ/dia*m ²)
0	13635,62
10	14853,35
20	15781,12
30	15925,73
32	15884,58
42	16038,09
45,12	16117,64
50	15827,17
60	15301,71
70	14594,62
80	13230,72
90	11709,81

Font: elaboració pròpia

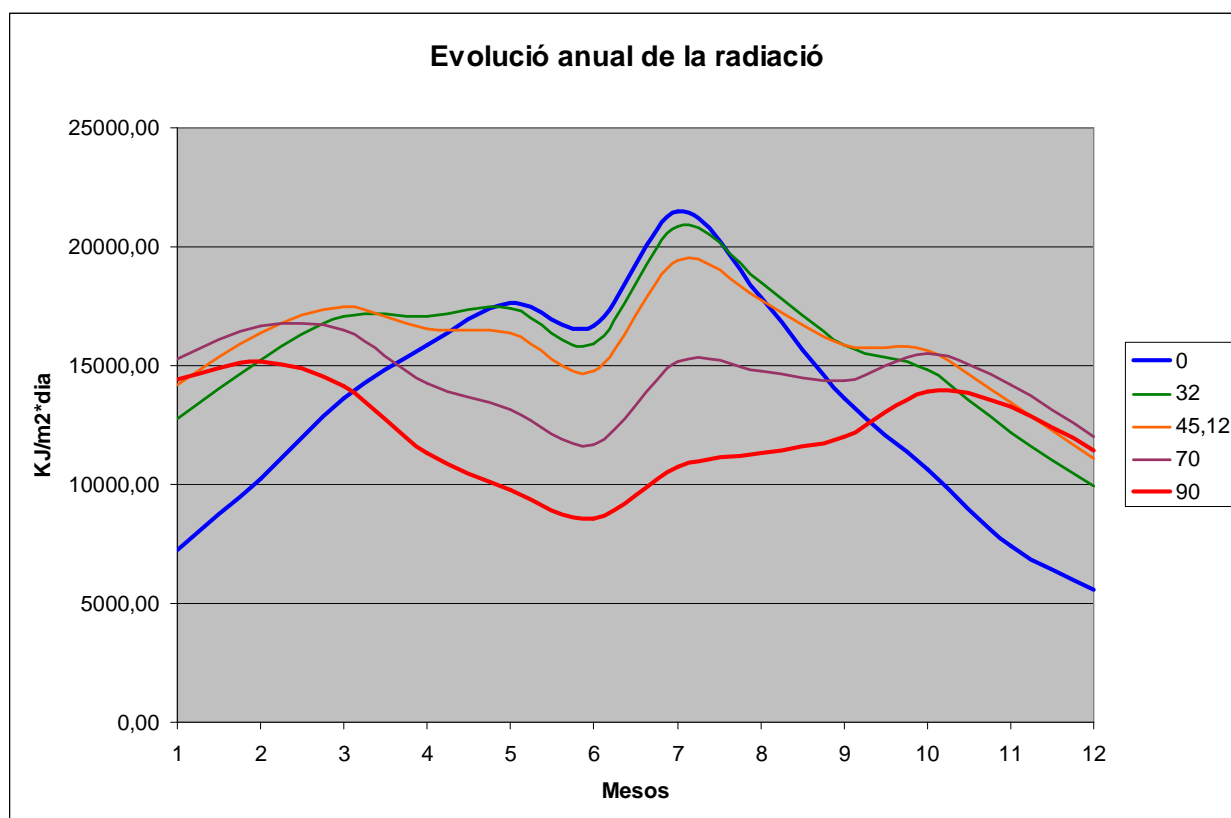


Font: elaboració pròpia

A partir dels primers resultats obtinguts, simulant de 0 a 90 graus, s'observa que el màxim s'ha de trobar entre 40 i 50 graus. Fent diverses aproximacions s'arriba a concloure que la radiació anual màxima es troba quan la placa està a 45,12° d'inclinació. Tot i tenir aquesta dada, no és suficient per justificar aquesta inclinació.

S'observa també, que entre 20 i 50 graus la radiació mitjana anual diària està per sobre de 15800 KJ/dia·m², i que la variació entre aquests graus és molt poca.

Per tenir més informació sobre la radiació incident, s'avalua com evoluciona pels diferents mesos donats diferents angles.



Font: elaboració pròpia

Si considerem els casos extrems, 0 i 90 graus, es veuen les grans diferències que els separen en la seva evolució al llarg de l'any.

- A **0 graus** es té una baixa radiació durant els mesos d'hivern i puntes molt elevades durant els mesos d'estiu. En general té una **fluctuació anual molt elevada**, la qual cosa seria un gran problema pel sistema de creixement de microalgues, ja que hi haurien mesos amb molt poca producció i mesos amb excessiva producció. Això faria que el dimensionat de la planta hagués de ser prou gran com per tenir capacitat per assimilar els pics de producció, mentre la resta de l'any no tindria utilitat.

- A **90 graus** es té ja d'entrada una radiació mitjana anual diària més baixa, però a diferència de l'anterior, **els màxims es donen a l'hivern i els mínims a l'estiu**. Un exemple similar a aquest és a 70 graus, que segueix un perfil similar al de 90 però amb una radiació mitjana més elevada i amb la particularitat que és el cas estudiat amb una radiació més alta en els mesos hivernals.
- A **45,12 graus** és on la **radiació mitjana anual diària és màxima** i, presenta a més a més nombrosos avantatges, ja que tot i tenir també màxims a l'estiu i mínims a l'hivern, en general és el cas més estable al llarg de l'any, produint unes oscil·lacions de radiació prou baixes com per poder mantenir un bon control sobre el nostre sistema.

També s'ha considerat els **32 graus**, ja que aquest serà l'angle que s'utilitzarà amb la col·locació de les plaques (més endavant s'explica el per què).

En aquest cas el comportament als mesos d'estiu és molt similar que a 0 graus, però està per sota dels angles més inclinats durant els mesos hivernals. Tot i això, si es menysprea el pic del mes de juliol, el comportament anual és força homogeni, la qual cosa garanteix un bon funcionament del procés.

7.7. Càlcul del creixement de l'alga

És proporcional a la radiació solar que arriba a la Terra:

$$E_c = \frac{100 * E_b * AX}{E}$$

$$E = \int_0^t I dt$$

On:

Ec: percentatge d'energia que es pot obtenir de la combustió de l'alga respecte la radiació solar rebuda (**10%**).

Eb: energia obtinguda de la combustió de l'alga (**2,4 x 10⁴ J/g**).

AX: grams de biomassa produïda. El que es busca per cada mes.

t: temps d'exposició llumínica del cultiu. Calculat per 1 dia (86400s).

I: intensitat llumínica en unitats W/m². Depèn de cada mes.

De les expressions anteriors interessa saber quina relació hi ha entre radiació solar i creixement de l'alga.

Substituint a les expressions anteriors, es té que pel mes de gener:

$$E = \int_0^{86400} 147,52 dt = 12745359,1 J / dia * m^2$$

$$10 = \frac{100 * 2,4 * 10^4 * AX}{12745359,1}$$

$$AX = \frac{10 * 1274359,1}{100 * 2,4 * 10^4} = 53,11 g / m^2 * dia$$

Aquest procediment es repeteix per a calcular, per a cada mes, quin creixement d'algues es produeix en funció de la superfície. Les puntes de producció de l'alga es troben en els mesos amb major radiació.

8. DISSENY DE LA PLANTA

8.1. Plantejament

La construcció d'una planta de producció de microalgues com a complement a la depuració de les aigües de sortida de la EDAR, permet per una banda reduir la quantitat de nitrogen i fòsfor presents a l'aigua, i per altra banda utilitzar el CO₂ resultant de la incineradora donant-li a aquest un ús, i reduint-ne la contaminació que suposa.

Actualment, la distribució d'espais a la zona de treball de Campdorà, on es pretén ubicar la nova planta de microalgues, s'organitza de la següent forma:

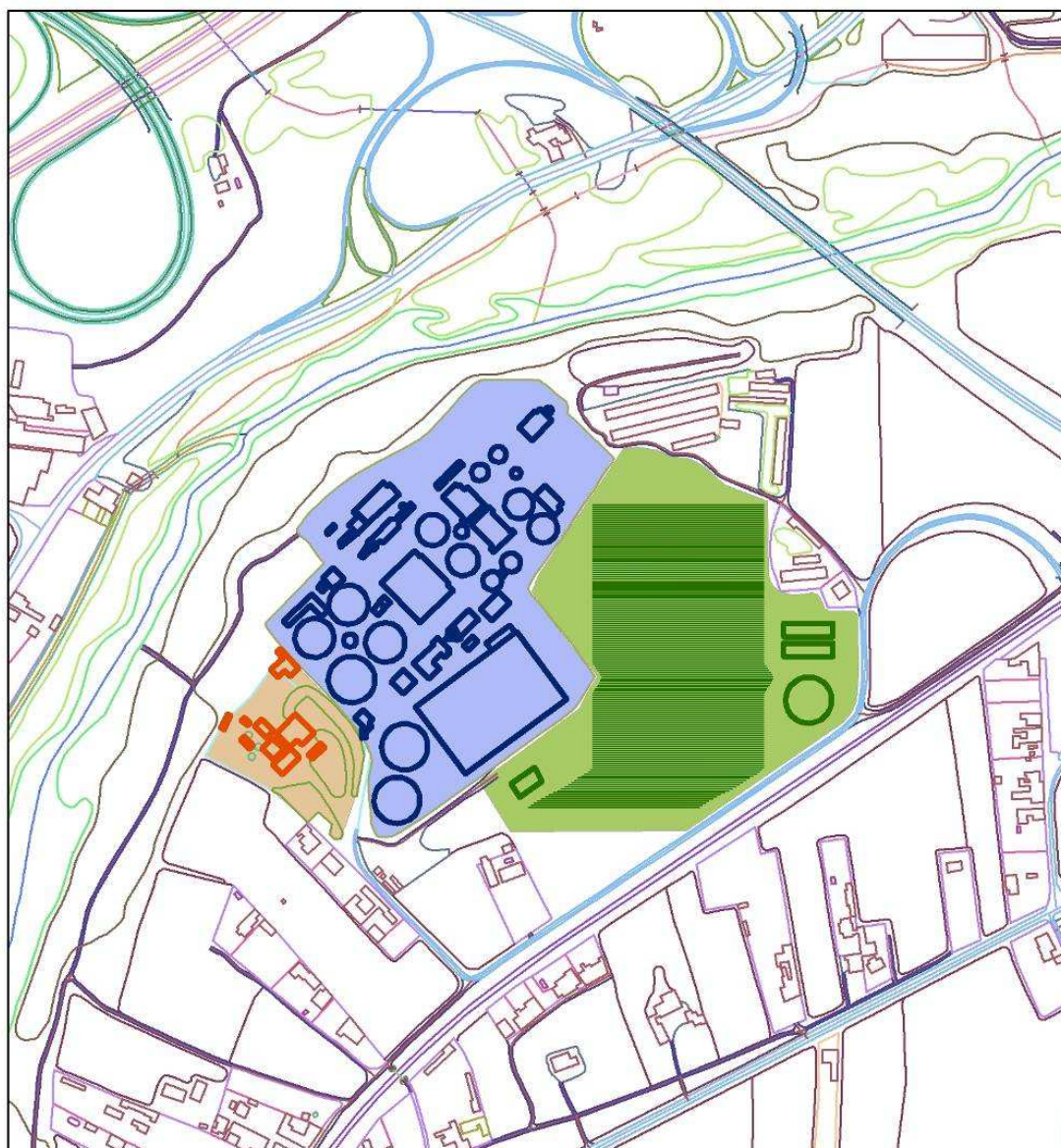
Tal i com mostren els següents mapes, la zona marró és l'àrea ocupada per la planta incineradora, i la zona blava correspon a la zona on s'ubica la planta depuradora d'aigües residuals. A la banda est, de color verd, és on es proposa ubicar la nova planta de producció de microalgues.

Comparativament, es pot observar com la superfície ocupada per la nova planta és aproximadament equivalent a la superfície actual de la depuradora.

El fotobiorreactor ocupa 2,83 ha totals (Apartat 8.2.2.2.), la qual cosa fa que, degut a la seva gran mida, s'hagi d'adaptar a la forma de la parcel·la que ocupa.

La parcel·la no s'ha triat a l'atzar. Partint del fet que ha d'estar el més a prop possible tan de la depuradora com la incineradora, i degut a la mida del fotobiorreactor, l'única possibilitat és la parcel·la finalment escollida.

Distribució dels sistemes de Campdorà



0 55 110 220 330 m



Sistemes

- Depuradora
- Sistema proposat de Fotobioreactor
- Incineradora

Font: elaboració pròpia.

Planta proposada



0 20 40 80 120 m

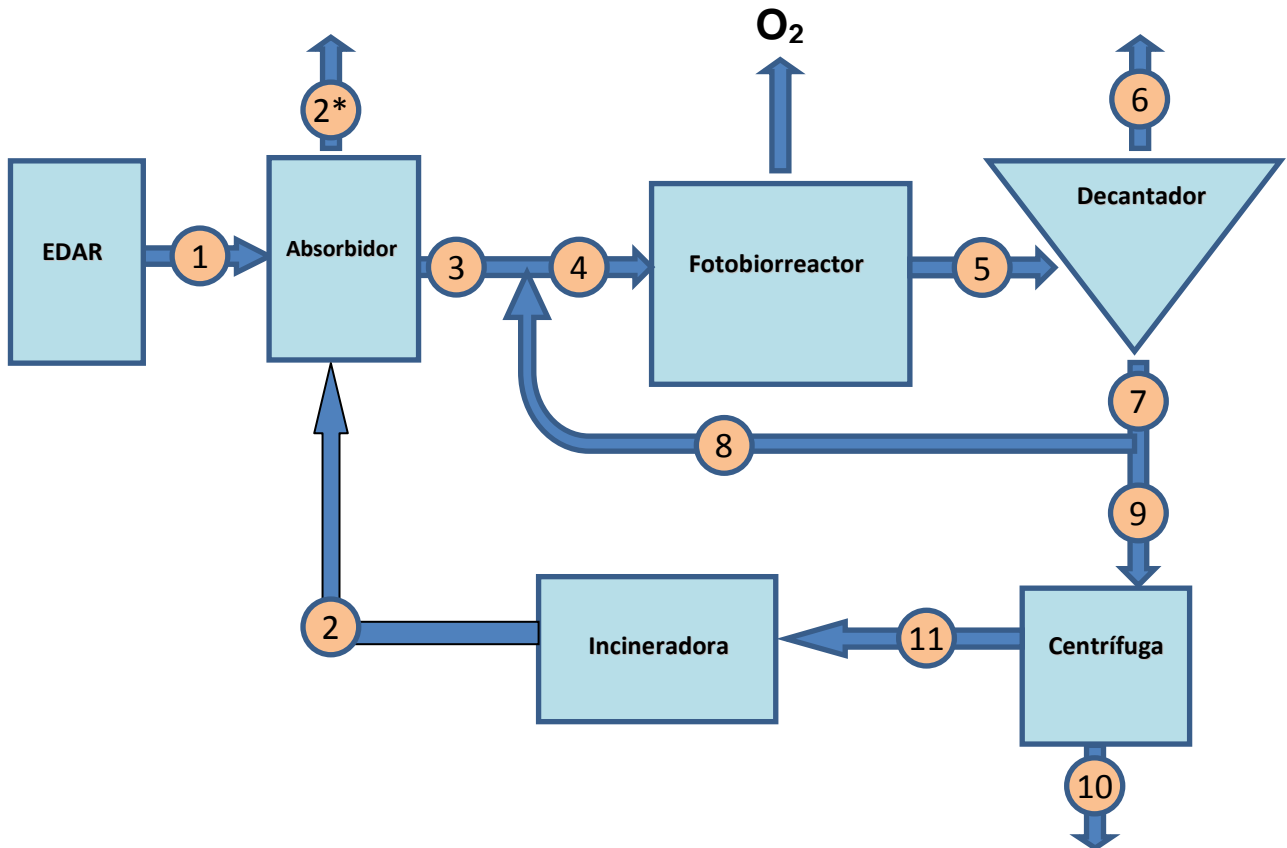


Font: elaboració pròpia.

8.2. Diagrama de procés

8.2.1. Esquema del procés

Esquema general amb les entrades i sortides de matèria (●) i els diferents dispositius que intervien en el reactor.

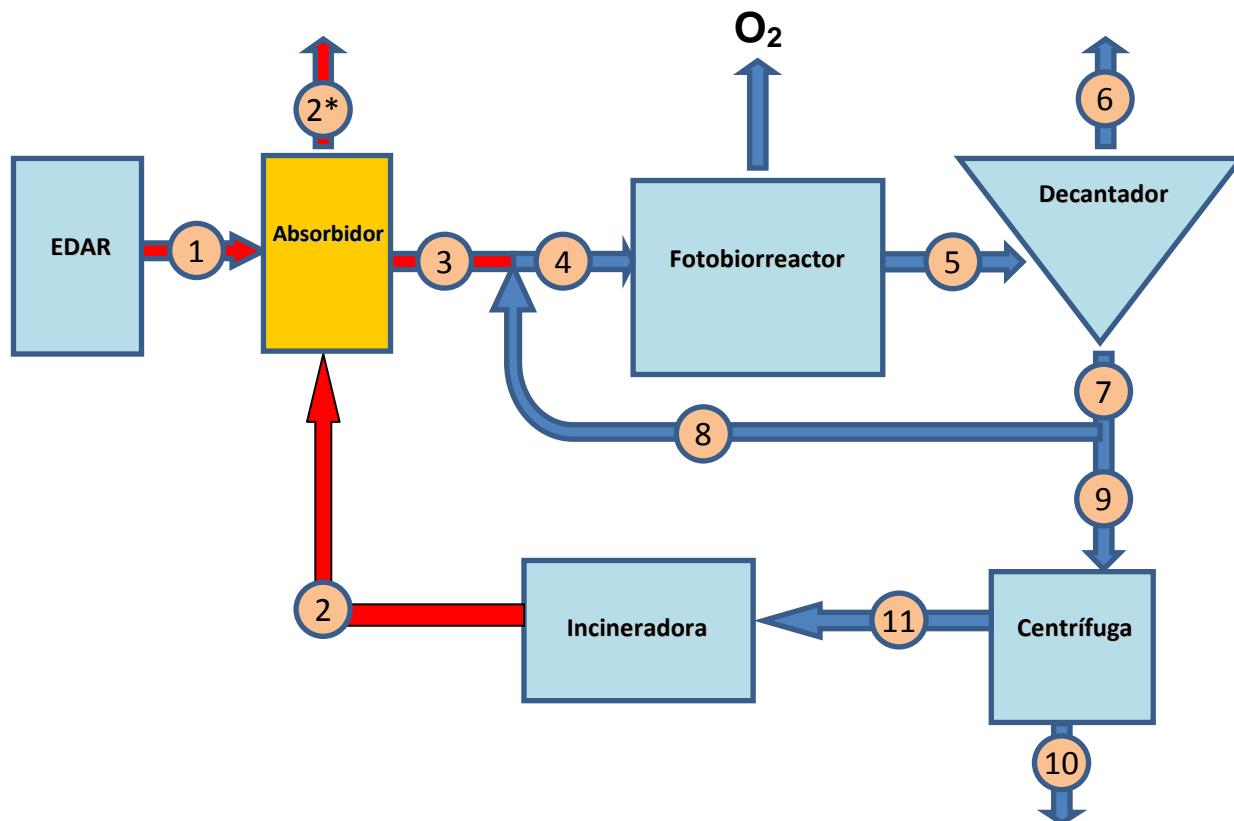


Font: elaboració pròpia

8.2.2. Unitats de procés

Primer de tot s'identifiquen els principals dispositius de la planta que condicionen i modifiquen els diferents corrents d'entrada i sortida.

8.2.2.1. Absorbidor



Funció del dispositiu: barrejar el CO₂ de la incineradora amb l'aigua i els nutrients de la EDAR.

El CO₂ i els nutrients, juntament amb la llum solar, són requeriments de les algues. El CO₂ té una solubilitat molt alta en aigua (1,45 Kg/m³ aigua).

Els absorbidors ofereixen una molt bona barreja/contacte entre gasos i líquids, i eficiències d'eliminació del gas superiors al 90%. Els equips més comunament utilitzats per a realitzar aquesta operació són les columnes de plats i les columnes amb rebliment.

No obstant, aquest aparell, juntament amb la centrífuga per assecar els fangs, serà un dels punts on tindrem major consum d'energia.



Detall d'un absorbidor
Font: www.zero.no

L'absorbidor té els corrents 1 i 2 com entrades i els 2* i 3 com a sortides.

Corrent 1: Aigua sortida EDAR

Aquest corrent conté les següents quantitats de nutrients:

	N Total (mg/L)	P Total (mg/L)
Gener	23	0,4
Febrer	13	0,6
Març	0,8	0,3
Abril	0,5	0,6
Maig	0,2	1,0
Juny	0,4	0,6
Juliol	0,3	0,7
Agost	0,3	0,5
Setembre	0,3	0,3
Octubre	1,3	0,9
Novembre	0,2	0,7
Desembre	6	0,4

Font: EDAR de Campdorà

Aquest corrent prové d'una part de les aigües de sortida de la EDAR de Campdorà. La quantitat d'aigua que necessitem ve determinada per la concentració dels dos nutrients principals, els nitrats i els fosfats, per tal de satisfer els requeriments de les microalgues.

Els cabals d'aigua de la depuradora varien entre 0,4-0,5 m³/s, tot i que la depuradora actualment s'està ampliant. Per tant, tenim un excés d'aigua i nutrients atenent a la dimensió del fotobiorreactor, que posteriorment detallarem.

Corrent 2: Entrada CO₂

Prové dels gasos de la planta incineradora de Campdorà. La quantitat de CO₂ necessària està condicionada per l'activitat fotosintètica de l'alga. Aquest corrent és l'aportació de CO₂ a l'absorbidor, responsable de la barreja del corrent 1 (aigua i nutrients) amb el CO₂ del corrent 2. L'eficiència de l'absorbidor s'ha fixat en un 90%, per tant hi haurà un excedent de CO₂.

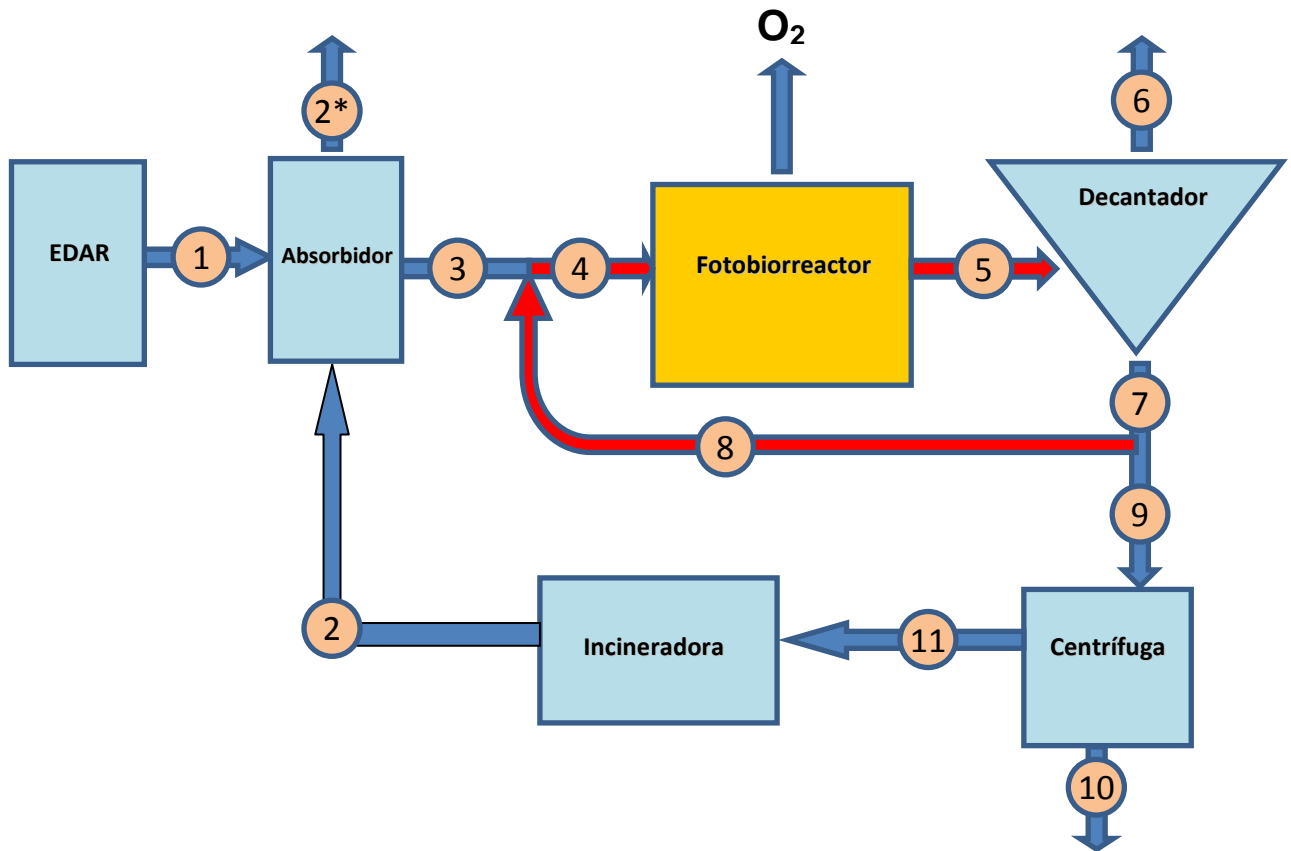
Corrent 2*: Sortida gas

Corrent de diòxid de carboni que representa el 10% del corrent de gas d'entrada. Correspon a la fracció de gas que no és absorbida per l'aigua. L'eficiència del 90% és possible atenent que la solubilitat del CO₂ en aigua és aproximadament de 1,45 kg/m³.

Corrent 3: Entrada condicionada

Corrent producte de la barreja del corrent 1 amb el corrent 2.

8.2.2.2. Fotobiorreactor



Funció: principalment establir una superfície per permetre l'arribada de la llum en el cultiu de les algues.

Es tracta d'un sistema tubular transparent. Hi ha producció d'oxigen que és alliberat al medi. La **solubilitat de l'oxigen** a l'aigua és molt petita si la comparem amb la del diòxid de carboni. A més a més, aquest gas ha de ser alliberat perquè inhibeix l'activitat fotosintètica.



Fotobiorreactor amb llum artificial
Font: www.cci-calidad.com/articulos689.htm

El fotobiorreactor té com a única entrada el corrent 4. Aquest és el corrent resultant de la unió dels corrents 3 i 8.

Corrent 4: Entrada fotobiorreactor

Aquest corrent presenta els nutrients necessaris per a les algues i ja du incorporat una quantitat d'algues provinents de la recirculació, provinent del corrent 8; la concentració d'algues de la qual és de 100 mg/L.

Corrent 8: Recirculació

Aquest corrent és el responsable de l'aportació d'una quantitat d'alga al fotobiorreactor. La concentració és la mateixa que al concentrat, 300 mg/L.

Es produeix la recirculació al 50% en volum de l'aigua que aporta el corrent 1, provinent de la EDAR. És important tenir una concentració d'entrada al reactor d'algues prou elevada. En el present estudi, es considera 100 mg/L com una bona concentració, ja que la velocitat de producció de biomassa és exponencial. Sinó, trigarien molt de temps a assolir la concentració desitjada de 150 mg/L que s'ha fixat en el corrent 5.

Com a sortides presenta el corrent 5 i un alliberament d'oxigen cap a l'exterior.

Corrent 5: Sortida fotobiorreactor

Aquest corrent té una concentració d'algues de 150 mg/L, que és la concentració òptima de sortida de les microalgues.

A més concentració, les pròpies microalgues es farien ombra entre elles mateixes i disminuirien la seva pròpia velocitat de creixement.

Pel contrari, menys concentració tampoc interessa ja que es pretén obtenir una important producció de biomassa.

Per altra banda, hi ha restes dels nutrients i diòxid de carboni que la microalga no ha fet servir per créixer, així com també una part d'oxigen dissolt a l'aigua.

Solubilitat de l'oxigen en funció de la temperatura de l'aigua:

T^a °C	Oxigen (mg/L)	T^a °C	Oxigen (mg/L)
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.05	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.38
6	12.06	24	8.25
7	11.76	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.86
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.42
14	9.98	32	7.32
15	9.76	33	7.22
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

Dins la unitat del fotobiorreactor també s'han de calcular altres característiques per tal de desenvolupar el seu disseny:

a) Dimensió dels tubs

A partir dels resultats obtinguts es considera que una bona superfície efectiva pel fotobiorreactor són de l'ordre de 2 Ha (considerant una superfície plana). Aquesta superfície però, està composta per tubs de característiques determinades.

Llargada dels tubs: 140 m.

Diàmetre dels tubs: 0,2 m.

A partir d'aquí es pot calcular el nombre de tubs necessaris per cobrir les dues hectàrees.

$$N^{\circ} \text{ tubs} \times (L \times \varnothing) = S$$

$$N^{\circ} \text{ tubs} = 2000 / (140 \text{ m} \times 0,2 \text{ m})$$

On:

S: superfície ocupada per els tubs

\varnothing : diàmetre dels tubs

L: longitud dels tubs

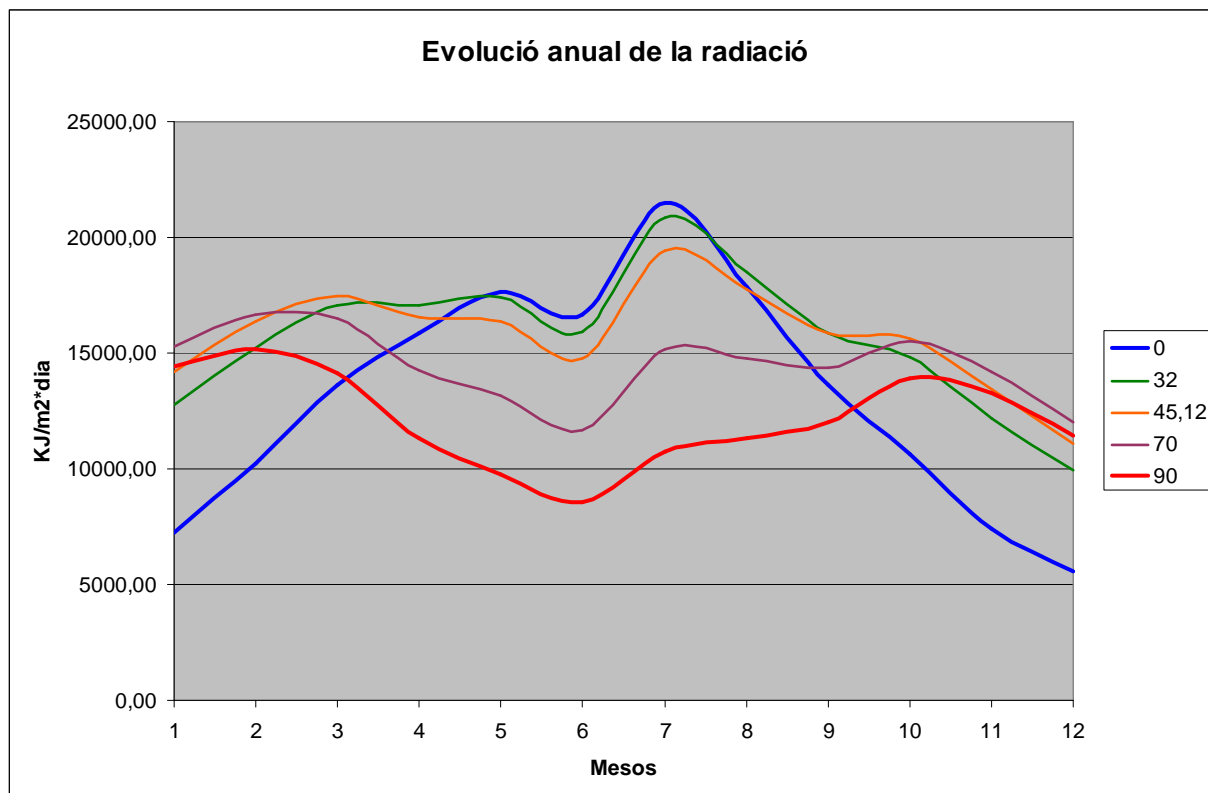
Per tant;

$$N^{\circ} \text{ tubs} = \frac{20000m^2}{140m * 0,2m} = 714 \text{ tubs}$$

Cada tub té una àrea efectiva equivalent de 28 m². Per tant, són necessaris 714 tubs per completar una superfície efectiva de 20.000 m².

b) Orientació i inclinació

Els tubs s'orientaran de Est a Oest de tal manera que la màxima superfície estigui exposada al Sud.



Font: elaboració pròpia

Tal com s'ha comentat en l'apartat de radiació solar, la màxima radiació anual diària es troba quan la inclinació de la placa es troba a 45,12°. Aquesta inclinació però, és massa elevada ja que produiria una ombra sobre la placa contigua, o per contra, necessitaríem molt més espai entre plaques.

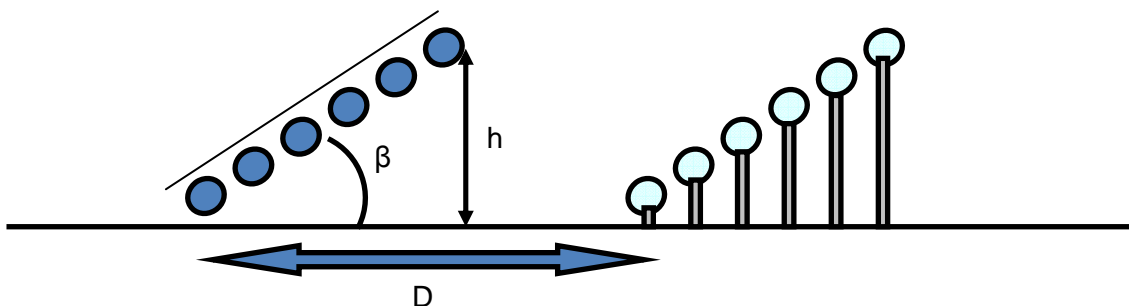
S'ha trobat una relació entre la inclinació de la placa i la separació entre plaques³, on es descriu que el *millor* angle és igual a la latitud menys 10°. Per tant, per Girona (42 ° N) la inclinació (angle $\beta=32^\circ$).

³ Font: Document Parc Solar a l' IES Vall d'Hebron

Es considera que una placa/suport està composta per 6 tubs, separats entre ells una distància de 5 cm. Per tant, es necessiten:

$$\text{N}^{\circ} \text{ suports} = \text{N}^{\circ} \text{ tubs} / \text{N}^{\circ} \text{ tubs per suport}$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ suports} = 714 / 6 = 119 \text{ suports}$$



Font: elaboració pròpia

c) Distància entre suports

Per calcular la distància mínima de separació entre suports (D):

Cada suport disposa de 6 tubs separats entre ells 5 cm ($L = 1,45\text{m}$).

L'angle d'inclinació β , com s'ha citat anteriorment és de 32° .

A partir d'aquests valors podem calcular la distància mínima de separació entre suports de tal manera que entre ells no es facin ombra.

$$D = (Lm * \cos \beta) + \frac{Lm * \sin(\beta)}{\text{Tg}(90^{\circ} - \beta)}$$

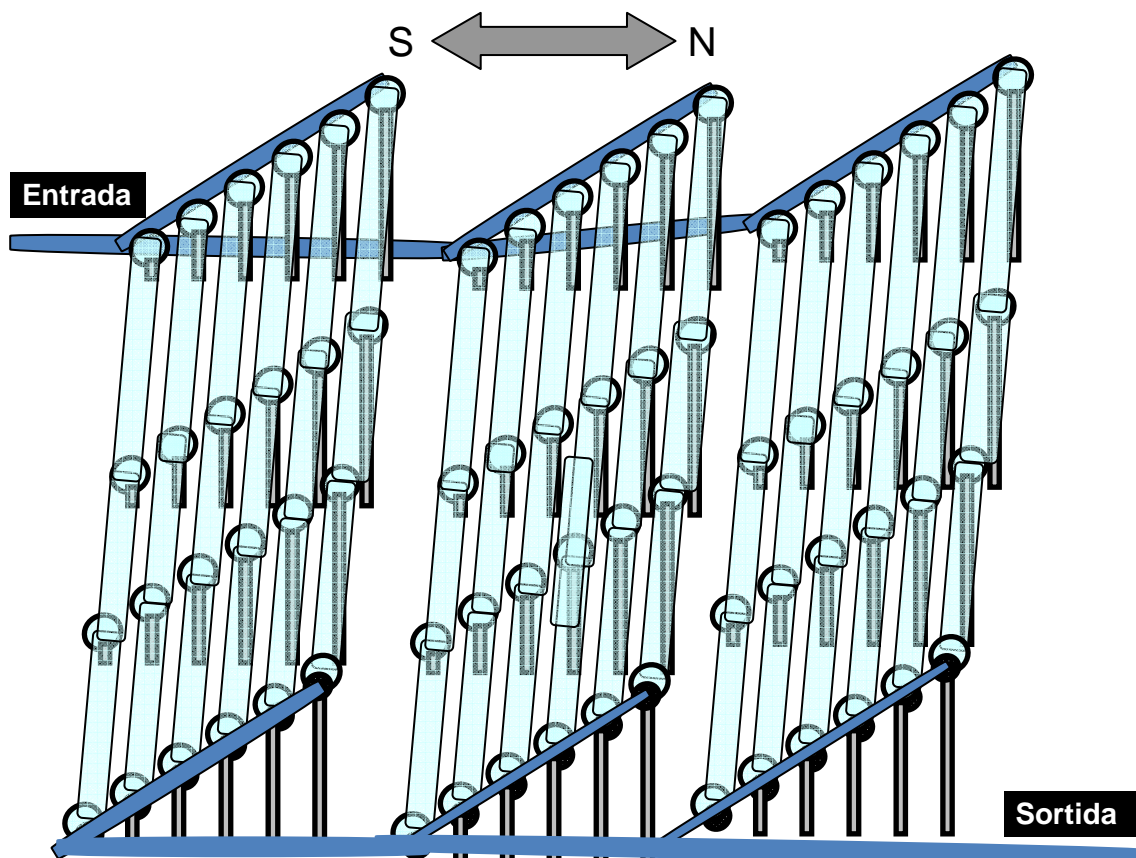
$$D = (1,45 * \cos 32) + \frac{1,45 * \sin 32^{\circ}}{\text{Tg}(90^{\circ} - 32^{\circ})} = 1,7 \text{ metres.}$$

d) Dimensió total del fotobiorreactor

Per calcular la dimensió o extensió total⁴ del fotobiorreactor es requereix la longitud dels tubs, el seu diàmetre i el nombre de suports.

Extensió total = L. tubs x (D x N^o suports)

Extensió total = 2,83 ha



Detall de 3 suports
Font: elaboració pròpia

⁴ Aquesta extensió total és l'àrea real que ocupa el fotobiorreactor sobre el territori.

e) Materials

El material dels tubs consisteix en un compost acrílic transparent.

Tot el sistema de suports es troba realitzat amb materials metàl·lics.

Les canonades també seran metàl·liques, tant les d'entrada com les de sortida d'aigua.

f) Consideracions en el fotobiorreactor

Cada tub haurà de tenir aproximadament cada 20 metres un sistema d'aeració per tal d'evitar les acumulacions d'oxigen.

Es buscarà, en la mesura del possible, que el sistema treballi en continu. És important no omplir tots els tubs a la vegada, sinó que es procedeixi d'una manera esglaonada. Primerament, per no tenir puntes de consum en el sistema de bombeig i, en segon lloc per un òptim funcionament de l'espessidor i la centrífuga.

El cabal d'aigua tractada, així com també la fixació de carboni i producció d'alga, ve determinada directament per la radiació solar. Per tant, la producció d'energia i la purificació de l'aigua dependrà fortament de les condicions climàtiques, així com també de l'aportació de nutrients de la EDAR.

No obstant, amb la inclinació de cada suport del fotobiorreactor s'aconsegueix homogeneïtzar la radiació solar que hi arriba, de la mateixa manera que fan les plaques solars.

En un aspecte en que no s'ha acabat d'aprofundir en aquest estudi és en la necessitat d'eliminació de les microalgues que surten del decantador. La concentració de microalgues és molt petita però, el cabal d'aigua és important.

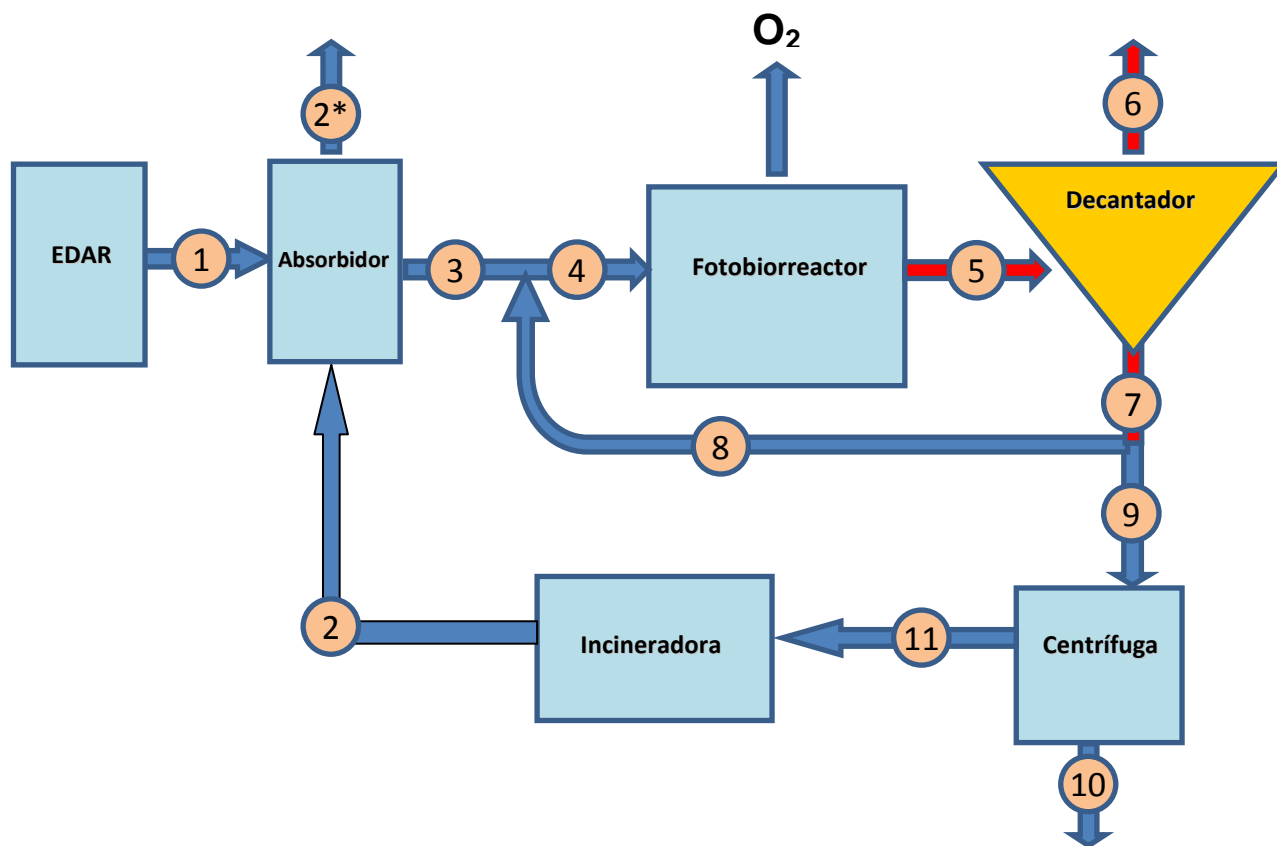
S'hauria d'estudiar quin és el sistema més eficient per eliminar o esterilitzar completament aquestes microalgues, de tal manera que no siguin alliberades al medi de forma activa.

Creiem que per la baixa concentració de microalgues i, el fet de que l'aigua presenti molt poques impureses, un bon sistema d'eliminació d'aquestes algues seria el tractament amb radiació ultraviolada.

No hem d'oblidar que estem tractant amb una espècie de microalga al·lòctona, i per aquesta raó s'ha de dissenyar un sistema de retenció d'aquestes.

El sòl és preferible que sigui d'un color clar per tal que reflecteixi al màxim la llum cap als tubs. En cas negatiu, es pot recobrir aquest amb lones o materials de colors clars per tal de reflectir la llum incident al sòl altra vegada cap als tubs.

8.2.2.3. Decantador



Funció: separar part de la fracció líquida per una banda, i obtenir així un concentrat de microalgues.

El decantador és un gran dipòsit amb una estructura central metàl·lica que gira molt lentament. A la part inferior s'hi dipositen les microalgues i per sobre s'extreu l'aigua neta. S'hi ha d'afegir un floculant per accelerar el procés de sedimentació.



Font: www.kmpt.com

Malauradament pel decantador, l'aspecte més important en quant a dimensions d'aquest és la velocitat de sedimentació.

La velocitat de sedimentació depèn directament de la capacitat del floculant a agregar les diferents cèl·lules de *Chlorella sp.* Aquesta interacció floculant-*Chlorella sp.* no està prou documentada. Caldria fer estudis en aquesta direcció.

No obstant, i de manera orientativa, les dimensions d'aquest decantador creiem que seria semblant a les d'una planta depuradora que tracti un cabal d'entrada al decantador màxim de 60.000 m³/dia.

El decantador té com a única entrada el corrent 5, que es correspon a la sortida del fotobiorreactor, ja explicat anteriorment.

Pel que fa a les sortides, consta dels corrents 6 i 7.

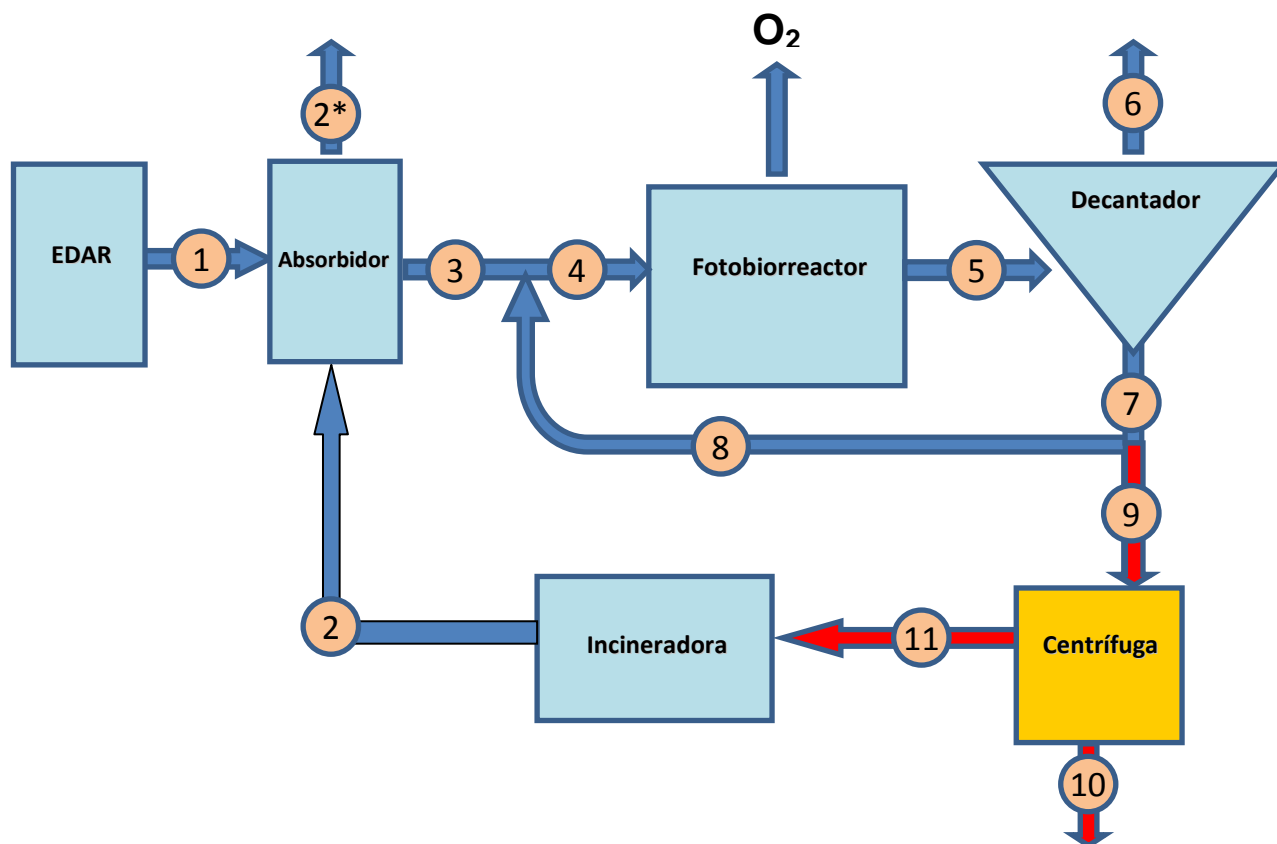
Corrent 6: Sortida d'aigua del decantador

Tal i com el seu nom indica, es tracta de la part d'aigua que podem separar de les algues per decantació. No obstant, aquest corrent tindrà una petita concentració de microalgues fixada a 1,5 mg/L.

Corrent 7: Concentrat

Aquest corrent té menys aigua que el de sortida del fotobiorreactor, per tant s'aconsegueix incrementar la concentració de la microalga en un 50%. La concentració d'alga és de 0,3 g/L.

8.2.2.4. Centrífuga de deshidratació



Funció: concentrar encara més i, per tant espessir les microalgues. S'obté també una fracció aquosa lliure d'aquestes microalgues; si més no amb concentracions molt petites.

La centrífuga és el darrer dispositiu que augmenta la concentració de microalga i separa la fracció aquosa. Per una banda, interessa recuperar l'aigua i, per altra tenir un concentrat amb molta biomassa i poca aigua.

La centrífuga té com a única entrada el corrent 9, que prové del corrent 7 que surt del decantador. Abans però, es produeix la prèvia separació d'una part d'aquest cap al corrent 8, que té la funció de recirculació d'una part de les microalgues per tal d'alimentar el fotobiorreactor.

No oblidem que el què es pretén és cremar aquesta alga i obtenir energia. Si hi ha grans quantitats d'aigua, l'energia necessària per a escalfar i evaporar aquesta serà molt important; per això es fan servir dos sistemes per augmentar la concentració de microalgues.

Corrent 9: Entrada centrífuga

Corrent de la mateixa concentració de algues que els corrents 7 i 8. És el corrent de purga del fotobiorreactor, on surt la producció final de microalgues.

Pel que fa a les sortides consten dels corrents 10 i 11.

Corrent 10: Espessit

L'espessit té un valor de concentració de 300 g/L (30% de sequedat). Es tracta d'una pasta rica en microalgues, la qual surt de la centrífuga i va a parar a la incineradora.

Conté el 45-50% de les microalgues produïdes al fotobiorreactor. Recordem que una part de la biomassa es perd pel decantador i una altra entra a la recirculació dins el mateix sistema.

Corrent 11: Permeat

Corrent d'aigua que surt de la centrífuga. A diferència del decantador, aquest corrent té una concentració de microalgues nul·la. Representa un 40% del volum d'aigua que entra a la centrífuga, i s'arriba a espessir per un factor de 1000.

Possibles característiques de la centrífuga:

Construcció	Estructura
Centrífuga	Dues fases, corrents paral·leles
Tipus	Z-1
Material	Acer inoxidable
Capacitat nominal	2.000 litres/hora
Potència elèctrica	12 kW a 380 V, 50 Hz
Arrencada	Estrella - triangle
Connexió elèctrica	Cetag de 63 ampers, 5 pols
Quadre elèctric	Automàtic/manual
Consum de aigua	2.000 litres a 2-3 bar de pressió
Entrada de aigua	Tub rosca de 1 ½"
Entrada de fangs	Tub rosca de 3"
Distància màx. escomeses	10 metres
Estació floculant	Líquid
Dipòsit	1 x 650 litres
Agitadors	1 x 0,5 kW
Cabalímetre	De fangs i de floculant
Compta - hores	Bomba de fangs
Cinta transportadora	1,8 metres
Pes	3 tones

 Font: www.iuexiste.es

Amb una centrífuga de les característiques que apareixen a la taula anterior, se n'hauria de tenir prou, atenent al cabal d'aigua tractat.

Per tant, amb una centrífuga de potència 12 KW es podria deshidratar diàriament la tona o tona i mitja d'alga produïda diàriament.

8.3. Balanç de matèria

Partim de la composició de la microalga per saber quins són els requeriments necessaris perquè pugui desenvolupar-se:

Elements (% pes)						
C	H	O	N	S	P	Cendres
54.0	8.6	31.0	3.3	0.36	0.95	2.1

Font: *Dioxide Fixation in Batch Culture of Chlorella sp. using a photobioreactor with a Sunlight-Collection Device.*

Els factors que condicionen el balanç de matèria són tres:

Els nutrients, la radiació solar i el CO₂ com a font de carboni. Considerem que el sofre no és important ja que l'aigua sempre té una certa quantitat d'aquest, i per tant el menyspreem.

➤ Els nutrients

Fòsfor, en forma bàsicament de fosfat; i nitrogen, bàsicament en forma d'amoni. A partir d'aquí tenim que la relació N/P de la *Chlorella sp.* és:

$$\frac{N}{P} = \frac{3,3g}{0,95g} = 3,47$$

és a dir, per cada gram de fòsfor es consumeix 3,47 grams de nitrogen.

La relació N/P de l'aigua provinent de la EDAR és:

$$\frac{N}{P} = \frac{2g}{0,6g} = 3,33$$

és a dir, per cada gram de fòsfor hi ha 3,33 grams de nitrogen.

Atenent a aquests valors sabem que, al balanç de matèria, el nitrogen és el nutrient limitant. De totes maneres, es fixa un coeficient d'eliminació del 90% de nitrogen, ja que l'eliminació del 10% restant és difícil degut a que resta en una concentració molt baixa.

➤ **La radiació solar**

Com ja s'ha calculat a l'**apartat 8.2.2.2.**, es disposa d'una determinada area efectiva del fotobiorreactor, en concret de 2 hectàrees atenent a la disponibilitat de superfície, la inclinació dels suports del fotobiorreactor, la llargada dels tubs i la distància de separació dels suports.

El total de radiació solar captada és directament proporcional a la superfície del fotobiorreactor, i condicionada per inclinació i orientació.

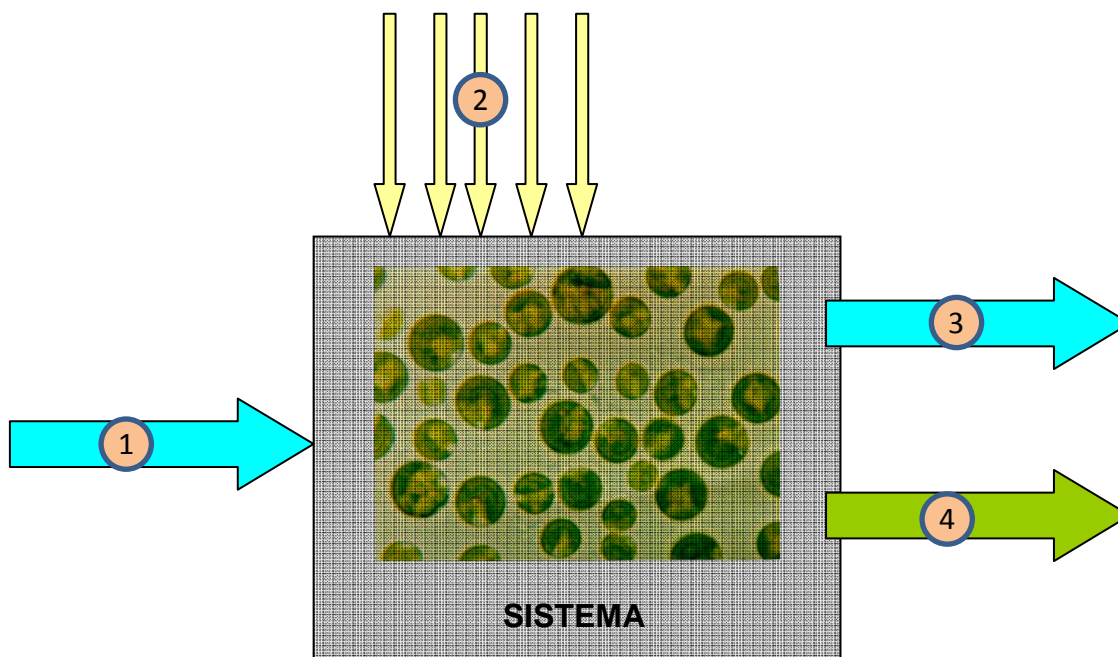
Finalment, afegir que la microalga tan sols és capaç d'aprofitar el 10% de l'energia solar que arriba al fotobiorreactor, tal com s'explica a l'**apartat 8.4.2.**

➤ **El Carboni**

El CO₂ és la font de carboni que requereixen les microalgues per créixer, i que prové de la incineradora.

Considerem que la incineradora produeix en escreix la quantitat necessària per la producció de microalgues. Per tant, només s'acaba utilitzant la quantitat estequiomètricament necessària a partir del nostre reactiu limitant.

8.3.1. Balanc de matèria global



Font: elaboració pròpia

Corrent 1: Cabal d'aigua carregat de nutrients i CO₂.

Corrent 2: Radiació llumínica que arriba al fotobiorreactor.

Corrent 3: Aigua que surt de l'espessidor. Conté una petita fracció de microalgues. És interessant observar com ha disminuït la concentració de nutrients i de diòxid de carboni.

Corrent 4: Compost per les microalgues produïdes al fotobiorreactor i que són la matèria primera per produir energia.

Corrent	Cabal (m ³ /dia)	CO ₂ (g/l)	NH ₄ ⁺ (mg N/l)	HPO ₄ ⁻² H ₂ PO ₄ ⁻ (mg P/l)	Llum (KW/m ²)	O ₂ (mg/l)	<i>Chlorella</i> (Kg/dia)
1	40.000	45	2	0,6	-	-	-
2	-	-	-	-	5-25	-	-
3	39992	0,184	0,2	0,082	-	7-10	60
4	7,07	0,184	0,2	0,082	-	7-10	1140

Font: elaboració pròpia

* Les cel·les buides tenen un valor negligible.

S'ha de tenir en compte que el balanç fa referència a un cabal d'entrada de 40.000 m³/dia. El nostre fotobiorreactor no pot tractar aquest volum d'aigua i eliminar el 90 % de nitrogen.

Això és degut a que a la realitat, el cabal d'entrada està condicionat per la radiació solar, ja que aquest paràmetre condiciona el creixement de les microalgues, i per tant la quantitat de nutrients que es fixen i són requerits per les algues.

8.3.2. Simulacions del balanç global

Les següents simulacions permeten veure com varia la producció de *Chlorella sp.* i la superfície del fotobiorreactor en funció de les concentracions d'entrada de nutrients.

Variació de nutrients P i N:

Considerant un cabal de 40.000 m³/dia que tractem en el fotobiorreactor, i per les característiques a la latitud de Girona, simulem què passaria si es produeixen variacions en les concentracions de nutrients a l'entrada del fotobiorreactor.

L'objectiu és eliminar el 90% del N d'entrada. Si el cabal que entra té una major concentració de nutrients, implicarà un augment de la biomassa, però a la vegada un augment de la necessitat d'espai de fotobiorreactor, considerant un temps de residència hidràulic igual:

Nutrients		Producció de <i>Chlorella</i> (kg/dia)	Superfície reactor (Ha)
mg N/L	mg P/L		
2	0,6	2181	3,35
1	0,3	1090	1,67
3	0,9	3272	5,02
4	1,2	4362	6,70
5	1,5	5453	8,37
6	1,8	6543	10,04
7	2,1	7634	11,72
8	2,4	8724	13,39
9	2,7	9815	15,06
10	3	10905	16,74
11	3,3	11996	18,41
12	3,6	13086	20,09
13	3,9	14177	21,76
14	4,2	15267	23,43
15	4,5	16358	25,11

Per tant, augmentant la concentració de nutrients a l'entrada del fotobiorreactor i mantenint constant la superfície, la producció d'alga no experimenta una variació. El que es produeix és una disminució del percentatge d'eliminació de nitrogen, que seria inferior al 90%.

És per tant extrapolable, amb les dades d'aquesta taula, que un increment de superfície del fotobiorreactor provoca un increment de producció de *Chlorella*, sempre i quan hi hagi els nutrients i el CO₂ necessaris.

Variació de la radiació

La mitjana anual de radiació a Girona que rep el fotobiorreactor és de 180 W/m² aproximadament. La superfície del fotobiorreactor és de 2 Ha. Sabem que la producció d'alga augmenta els mesos d'estiu ja que hi ha una major radiació.

La taula mostra la producció de *Chlorella sp.* en funció de la radiació solar, és a dir com afecta la radiació en la producció d'alga. Fixada una superfície i suposant que tenim nutrients necessaris per les microalgues.

Sabem que per produir 0,36 Kg d'alga cal 1 KW d'energia solar. A partir d'aquesta relació, es calcula a diferents valors de radiació quina producció de *Chlorella* tenim.

Radiació solar W/m ² ·dia	Producció de <i>Chlorella</i> kg/dia
180,98	1303,056
10	72
20	144
40	288
60	432
80	576
100	720
150	1080
200	1440
250	1800
300	2160
400	2880

Aquests valors de producció de *Chlorella sp.* no són realment els aprofitables, ja que aproximadament un 1% en massa es perd pel decantador.

8.3.3. Balanc de matèria unitari

Amb una superfície del fotobiorreactor: 2Ha (Apartat 8.2.2.2)

Una mitjana anual de radiació solar: 181 W/ m² dia (Apartat 7.6)

Un creixement de *Chlorella sp.* de: 36 grams/m² dia (Apartat 7.7)

La següent composició de l'alga:

Elements (% pes)						
C	H	O	N	S	P	Cendres
54.0	8.6	31.0	3.3	0.36	0.95	2.1

Paràmetres funcionals de la planta:

Alga no sedimentada	1%
Factor concentració	2
Factor espessidor	1000
Recirculació	50%
Sequedat centrífuga	40%

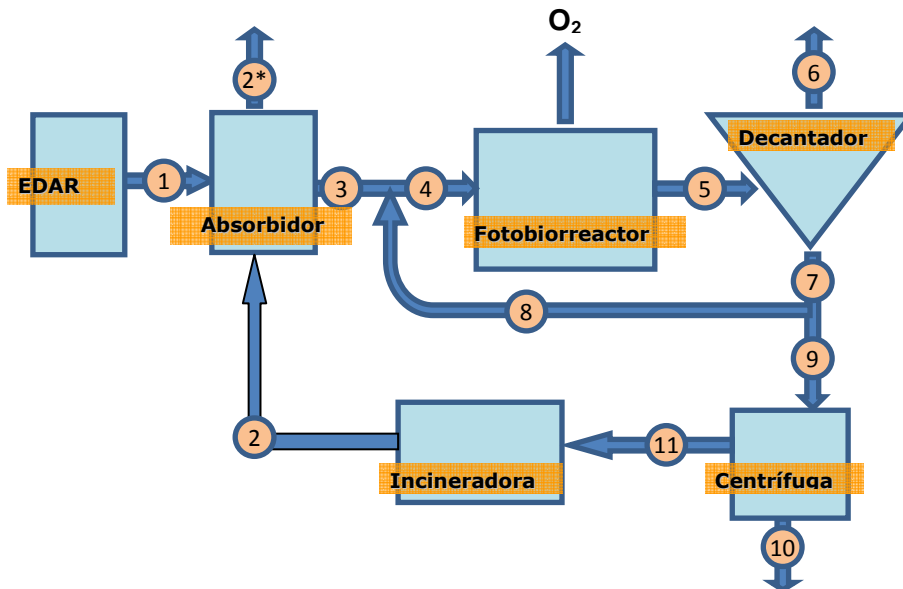
El 99% de la microalga es pot aprofitar, però un 1% de la que es produeix al fotobiorreactor es perd pel corrent d'aigua neta que surt del decantador. Aquesta quantitat és la que no ha sedimentat.

El decantador és capaç d'augmentar al doble la concentració de microalgues (de 150 mg/L a 300 mg/L). És l'indicat en el **factor de concentració**.

La centrífuga és capaç d'augmentar un factor de 1000 la concentració de microalgues, aconseguint un 40% de sequedat.

Per a un òptim funcionament del fotobiorreactor s'ha de recircular el 50% de les microalgues produïdes en el fotobiorreactor.

A partir del cabal de sortida de la depuradora i la incineradora i, tenint les seves respectives concentracions, es calcula el balanç de matèria de les etapes del procés. Tenint en compte l'estequiometria de l'alga, s'arriba a saber els Kg finals aprofitables que s'obtenen:



Cor.	Identificador	Prop.	Q m ³ /dia	Carboni mg C- CO ₂ /l	Nitrogen mg N- NH ₄ ⁺ /l	Fòsfor mg P- PO ₄ ³⁻ /l	Chlorella mg Phy/l		
1	Aigua EDAR	líquid	23888,87	0	2,000	0,600	0,00		
2	Gas entrada	gas	200,00	45000	0	0,000	0,00		
2*	Gas sortida	gas	200,00	2250	0	0,000	0,00	Producció total aigua neta	
3	Entrada condicionada	líquid	23888,87	357,91	2,000	0,600	0,00	23884,65	m ³ /dia
4	Entrada reactor	líquid	35833,31	348,09	1,400	0,427	100,000		
5	Sortida reactor	líquid	35833,31	328,45	0,200	0,082	150,00	Pèrdua alga decantador	
6	Aigua neta	líquid	23881,83	328,45	0,200	0,082	1,50	35,82	Kg Phy/dia
7	Concentrat	líquid	11951,48	328,45	0,200	0,082	300,00		
8	Recirculació	líquid	11944,44	328,45	0,200	0,082	300,00		
9	Entrada espessidor	líquid	7,04	328,45	0,200	0,082	300,00	Kg d' alga aprofitables	
10	Espressit algues	líquid	4,22	328,45	0,200	0,082	300000,00	1267,21	Kg Phy/dia
11	Permeat	líquid	2,82	328,45	0,200	0,082	0		

Font: elaboració pròpia

Es representa una mitjana anual. No obstant, per cada mes es té una radiació mitjana característica que farà canviar la producció d'alga del fotobiorreactor.

Producció mes a mes:

S'ha de tenir en compte la variació anual de radiació. Així es pot saber quin cabal d'aigua s'hauria de tractar per tal que aquest pugui aportar les necessitats de nutrients requerides per les microalgues. Recordem que el nitrogen és el nutrient limitant, i el fotobiorreactor treballa eliminant el 90% de N. Aquest té una superfície de 2 Ha.

	<i>Chlorella</i>	Q EDAR	Eliminació/Fixació per les algues			Producció neta	Pèrdua alga
			g/m ² ·dia	m ³ /dia	Kg N/dia		
Gener	53,106	19472,08	34,086	9,81	557,77	1032,9	29,20
Febrer	63,537	23296,74	40,781	11,74	667,33	1235,8	34,93
Març	71,165	26093,78	45,678	13,15	747,45	1384,2	39,13
Abril	71,024	26042,25	45,587	13,12	745,97	1381,4	39,05
Maig	72,479	26575,65	46,521	13,39	761,25	1409,7	39,85
Juny	66,264	24296,81	42,532	12,24	695,98	1288,8	36,43
Juliol	86,893	31860,92	55,773	16,06	912,65	1690,1	47,78
Agost	77,193	28303,92	49,546	14,26	810,76	1501,4	42,44
Setembre	66,107	24239,41	42,431	12,22	694,33	1285,8	36,35
Octubre	61,759	22644,83	39,640	11,41	648,66	1201,2	33,96
Novembre	50,886	18658,05	32,661	9,40	534,46	989,7	27,98
Desembre	41,406	15182,05	26,576	7,65	434,89	805,3	22,77
ANUAL (mitjanes)	65,151	23888,87	41,818	12,04	684,29	1267,21	35,82

La variació en la producció de microalgues varia entre els gairebé 1700 Kg d'alga per dia en els mesos d'estiu i els poc menys dels 1000 Kg en els mesos de menor radiació solar. Això fa que el cabal d'aigua de la EDAR que tractem tampoc sigui constant, ja que és necessari un major cabal d'aigua els mesos d'estiu.

8.4. Balanç d'energia

Per poder fer un balanç d'energia, s'ha de concretar primerament quins són els guanys i quines són les pèrdues energètiques. A partir d'aquí podem saber si tenim excedent energètic o si, per contra, tenim deficiència.

8.4.1. Identificació dels guanys

A continuació, per tal de fer un balanç d'energia global, es necessita conèixer el balanç individual de cada element, així com els d'entrada i els de sortida.

Entrada d'energia al sistema; mitjana anual de la radiació solar que arriba als tubs:

Energia:

- **15,63 MJ/dia m²** al total de la superfície del reactor. Això suposa: **312,73 GJ/dia**.

Potència (mitjana diària):

- **180,98 W/m²** al total de la superfície efectiva del reactor. Suposa **3,62 MW** de mitjana.

Aquesta seria l'energia que es podria arribar a produir si es tingués una eficiència del 100% en la conversió d'energia solar a energia elèctrica, la que ens interessa. No obstant, és impossible aconseguir una eficiència del 100%.

Tot seguit, s'identifiquen on es situen aquestes pèrdues d'energia.

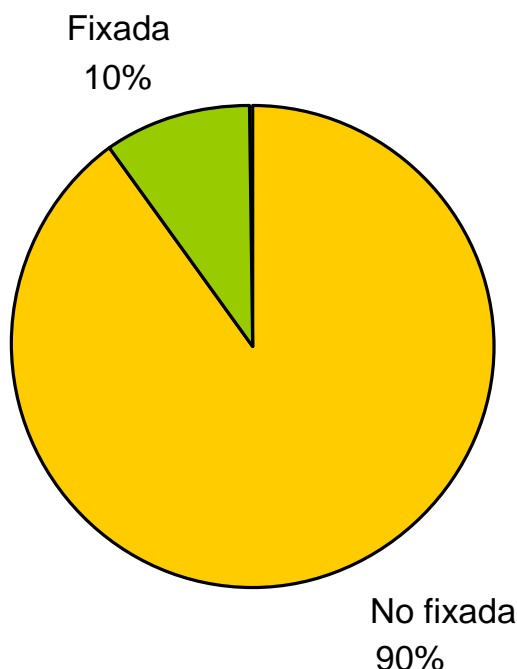
8.4.2. Identificació de pèrdues

➤ Capacitat fotosintètica de la microalga

La capacitat fotosintètica de l'alga és del 10%. Es coneix que l'alga és capaç de fer servir un 10% de l'energia solar que li arriba per a realitzar les funcions vitals per formar la biomassa.

Aquest percentatge es calcula mesurant, per una banda la radiació que arriba al cultiu i, per altra banda la producció energètica en pes sec que es desprèn en la combustió d'aquesta. És un paràmetre que caracteritza la cinètica de l'alga (Ec).

Energia fixada en forma de biomassa



Font: elaboració pròpia

Per tant, energia aprofitable de la combustió de l'alga:

$$15,6363541 \text{ MJ/dia m}^2 * 0,1 = \mathbf{1,5636 \text{ MJ/dia}}$$

Potència: 0,180 W/m² al total de la superfície efectiva del fotobiorreactor. Arriben **361,9 KW/dia** de mitjana anual.

➤ **Pèrdua de matèria en el sistema**

Una petita part de les algues produïdes en el fotobiorreactor es perd en el decantador. Aquesta pèrdua suposa, en massa, un 2,75% de producció total de l'alga del fotobiorreactor.

➤ **Consum energètic del aparells de la planta**

En aquestes pèrdues hi són implicats l'absorbidor, l'espessidor, la centrífuga i els equips de bombeig.

Absorbidor:

Potència:	12 KW
Hores en funcionament (aprox.):	12 h/dia
Consum energètic:	518,4 MJ/dia

Espessidor:

Potència:	Molt baixa
Hores en funcionament:	24 h/dia
Consum energètic:	Molt baix

Centrífuga:

Potència:	12 KW
Hores en funcionament:	12 h/dia
Consum energètic:	518,4 MJ/dia

Equip de bombeig:

Potència:	7 KW
Hores en funcionament:	12 h/dia
Consum energètic:	302,4 MJ/dia

Per calcular l'energia necessària aproximada, s'ha considerat l'energia potencial necessària per elevar 1 metre el cabal d'entrada al fotobiorreactor, amb un motor d'eficiència del 80%.

➤ **Pèrdua d'energia per evaporació de l'aigua**

Les proporcions del corrent d'espessit són els següents:

Pes d'aigua	60 %
Pes d'alga espessit	40 %
Rendiment incineradora	30 %

Calor específica: **4,18 KJ/Kg °K**

Calor latent: **2272 KJ/Kg**

Calor combustió de l'alga: **$2,4 \cdot 10^4$ KJ/Kg**

Considerant els valors anteriors, s'ha calculat en funció de la temperatura de l'espessit el rendiment energètic.

Dades per cada kg d' espessit produït			
T °C	Pèrdua energètica (KJ /Kg)	Guany energètic brut (KJ / Kg)	Guany- pèrdues (KJ / Kg)
10	1588,92	9600	8011,08
15	1576,38	9600	8023,62
20	1563,84	9600	8036,16
25	1551,30	9600	8048,70
26	1548,79	9600	8051,21
27	1546,28	9600	8053,72
28	1543,78	9600	8056,22
29	1541,27	9600	8058,73
30	1538,76	9600	8061,24
31	1536,25	9600	8063,75
32	1533,74	9600	8066,26
33	1531,24	9600	8068,76
34	1528,73	9600	8071,27
35	1526,22	9600	8073,78
36	1523,71	9600	8076,29
37	1521,20	9600	8078,80
38	1518,70	9600	8081,30
39	1516,19	9600	8083,81
40	1513,68	9600	8086,32
45	1501,14	9600	8098,86
50	1488,60	9600	8111,40

Font: elaboració pròpia

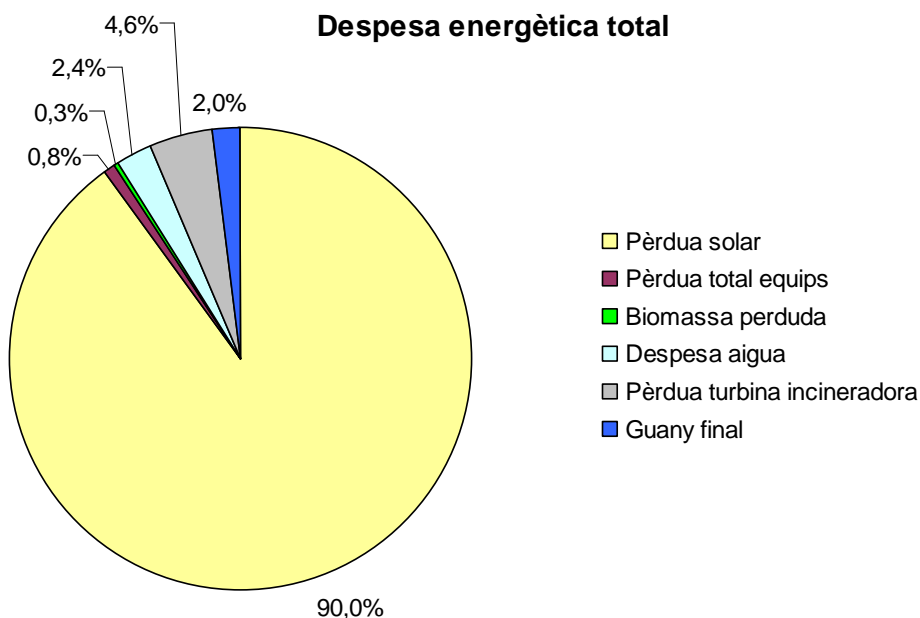
Finalment s'ha de tenir en compte el rendiment de la de la turbina de producció energètica a la incineradora: 30% d'eficiència.

Taula resum:

	KJ/dia
Energia solar	312.727.082
Pèrdua solar	281.454.373,76
Consum bombeig	345.600,00
Consum centrífuga	1.036.800,00
Consum absorbidor	1.036.800,00
Pèrdua total equips	2.419.200,00
Biomassa perduda	859.739,15
Despesa aigua	7.651.767,84
Pèrdua turbina incineradora	14.239.400,84
Guany final	6.102.600,36

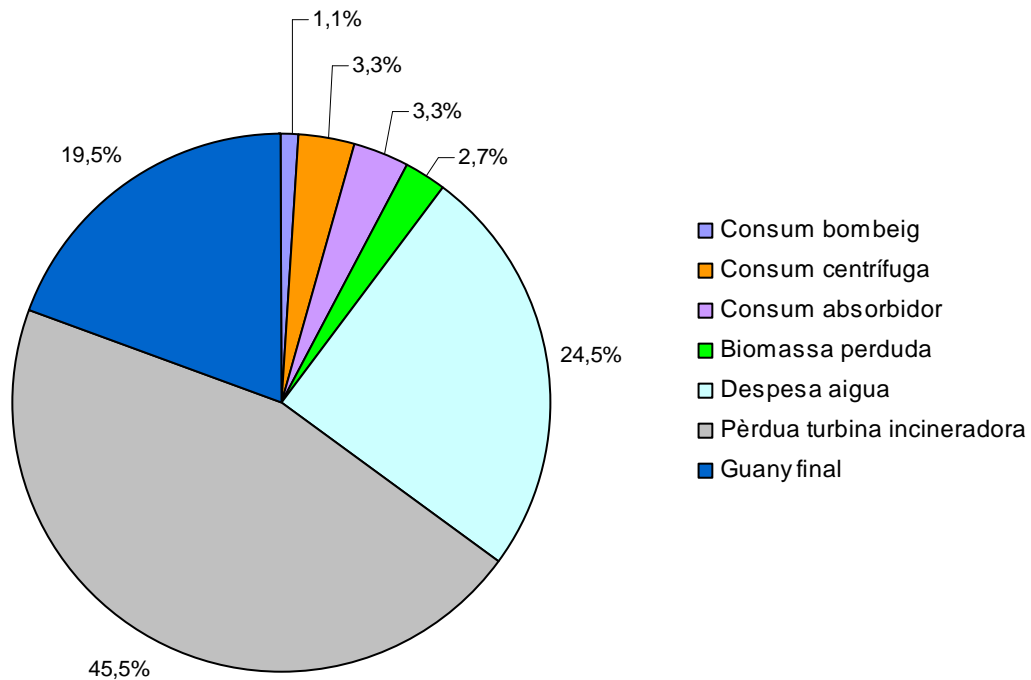
Font: elaboració pròpia

Gràfics de consums energètics:



Font: elaboració pròpia

Distribució del 10% energètic assimilat per les microalgues



Font: elaboració pròpia

És interessant veure quins són els punts on hi ha una pèrdua d'energia i què fa que el nostre sistema no sigui prou eficient.

Sens dubte, la pèrdua o no aprofitament energètic més important depèn de la pròpia microalga. La *Chorella* capta tan sols el 10% de la radiació que li arriba. Per tant, tot i la posterior presència de centrífugues, decantadors o equips de bombeig molt eficients, d'entrada ja tenim que el 90% de l'energia de la radiació solar no és aprofitada.

En altres punts hi ha despesa energètica, però són valors petits. Aquests són els següents equips:

- Centrífuga.
- Espessidor.
- Equip de bombeig de l'aigua.
- Turbina de generació d'electricitat de la incineradora.

També cal considerar el consum energètic que suposa evaporar l'aigua que no s'ha pogut eliminar en el procés de centrifugació. Globalment, suposa un 2,5% de les pèrdues. En cas que no es tingui en compte la radiació que no ha estat fixada per la microalga, aquestes pèrdues suposen fins un 24 % aproximadament.

També es podria espessir encara més per tal de disminuir les pèrdues per evaporació. No obstant, per assecar més les microalgues també caldrien equips amb un consum energètic més elevat.

Taula resum del balanç energètic:

La següent taula mostra els diferents punts de producció i consum energètic i la variació anual d'aquests, calculat als apartats anteriors.

Tal com s'ha vist en el balanç de matèria, els mesos de més producció són els estiuencs. Per tant, també són aquests mesos els que produeixen una major quantitat d'energia i com a conseqüència, el rendiment global també és lleugerament superior.

Balanç energètic de la planta:

	Producció energètica bruta	Potència bruta	Despesa energètica per l'aigua	Consum espessidor	Consum bombeig	Consum centrífuga	Consum absorbidor	Producció energètica neta		Potència neta	Rendiment intermedi ⁵	Rendiment net
	KJ/dia (10 ⁶)	KW	KJ/dia (10 ⁶)	KJ/dia	KJ/dia (10 ⁴)	KJ/dia (10 ⁶)	KJ/dia (10 ⁶)	KJ/dia (10 ⁶)	KWh/dia (10 ⁶)	KW	%	%
Gener	24,78	286,92	6,23	Negligible	34,56	1,0368	1,0368	4,84	1344,47	56,02	19,52	1,90
Febrer	29,65	343,28	7,46	Negligible	34,56	1,0368	1,0368	5,93	1648,16	68,67	20,01	1,95
Març	33,22	384,49	8,35	Negligible	34,56	1,0368	1,0368	6,73	1870,23	77,93	20,27	1,97
Abril	33,15	383,73	8,34	Negligible	34,56	1,0368	1,0368	6,71	1866,14	77,76	20,26	1,97
Maig	33,83	391,59	8,51	Negligible	34,56	1,0368	1,0368	6,87	1908,50	79,52	20,31	1,97
Juny	30,93	358,01	7,78	Negligible	34,56	1,0368	1,0368	6,21	1727,56	71,98	20,11	1,96
Juliol	40,56	469,47	10,20	Negligible	34,56	1,0368	1,0368	8,38	2328,14	97,01	20,66	2,01
Agost	36,03	417,06	9,06	Negligible	34,56	1,0368	1,0368	7,36	2045,72	85,24	20,44	1,99
Setembre	30,85	357,17	7,76	Negligible	34,56	1,0368	1,0368	6,20	1723,00	71,79	20,10	1,95
Octubre	28,82	333,67	7,25	Negligible	34,56	1,0368	1,0368	5,74	1596,39	66,52	19,93	1,94
Novembre	23,75	274,93	5,97	Negligible	34,56	1,0368	1,0368	4,60	1279,84	53,33	19,40	1,89
Desembre	19,32	223,71	4,86	Negligible	34,56	1,0368	1,0368	3,61	1003,85	41,83	18,70	1,82
Anual (mitjana)	30,41	352,00	7,65	Negligible	34,56	1,0368	1,0368	6,10	1695,17	70,63	20,07	1,95

Font: elaboració pròpia

⁵ Rendiment intermedi: que té en compte les pèrdues energètiques dels equips i l'energia necessària per evaporar l'aigua continguda en el corrent espessit respecte l'energia continguda a la biomassa.

9. DIAGNOSI. ANÀLISI I DISCUSSIÓ DE DADES

➤ Volum d'aigua tractada i superfície del fotobiorreactor:

1,194 m³/m² dia: el cabal depèn de les concentracions de nutrients, per tant és un valor característic per l'aigua de la depuradora que tractem.

Aquest paràmetre característic per les condicions de Campdorà podria sofrir modificacions si:

- Es fixa una eliminació de N menor. El fotobiorreactor proposat treballa eliminant el 90% del nitrogen. Si es vol eliminar un percentatge menor de nutrients, es pot tractar un cabal més gran, degut a un menor temps de residència hidràulic.
- Variant la latitud on s'instal·la el fotobiorreactor, també varia la radiació solar incident. Així, un desplaçament al Nord, tindria una menor radiació solar i, per tant, per fer créixer la mateixa quantitat d'algues produïdes a Girona, es necessitaria una major superfície de fotobiorreactor donat un mateix cabal d'aigua.

➤ Producció energètica:

3,532 W/m²: és la producció energètica en funció de la superfície efectiva del fotobiorreactor.

S'aprofita, com ja s'ha especificat en el balanç d'energia, aproximadament el 2% de l'energia solar. A major radiació solar, major serà la producció energètica donada una mateixa superfície.

➤ Relació producció de biomassa-eliminació de compostos en funció de la radiació solar incident:

Kg alga/KW·dia	Kg·CO ₂ /KW·dia	Kg·NH ₄ ⁺ /KW·dia	Kg·HPO ₄ ²⁻ /KW·dia
0,36	0,713	1,527·10 ⁻²	1,060·10 ⁻²

Font: elaboració pròpia

- **Relació producció de biomassa-eliminació de compostos per metre quadrat de fotobiorreactor i dia.**

g alga/m ² ·dia	g CO ₂ /m ² ·dia	g NH ₄ ⁺ /m ² ·dia	g HPO ₄ ²⁻ /m ² ·dia
65,15	129,00	2,76	1,92

Font: elaboració pròpia

- Així doncs, tenim que per cada 100 grams de *Chlorella sp*:

Per cada 100 grams de alga	
Fixem:	198 g CO ₂
	4,24 g NH ₄ ⁺
	2,9 g HPO ₄ ²⁻
Necessitem:	5,45 L d'aigua

Font: elaboració pròpia

10. CONCLUSIONS

- La depuració de les aigües gràcies a la fixació de nutrients per part de les microalgues, no s'ha de considerar una substitució de les EDARs, sinó com un complement; pretén augmentar la qualitat de les aigües sortints de la depuradora.
- La producció d'energia mitjançant microalgues no pretén substituir altres energies alternatives, sinó diversificar la possibilitat d'obtenir energia de manera neta.
- Les microalgues proporcionen un tractament terciari de les aigües residuals depurades per la seva habilitat per incorporar N i P inorgànics al seu creixement.
- La reutilització de CO₂ és una bona manera de mitigar el canvi climàtic, ja que produïm nova energia sense haver d'augmentar la quantitat total de CO₂ emesa.
- La biomassa produïda ha de trobar un ús econòmic. Hi ha molts possibles productes susceptibles de ser generats a partir de la biomassa de microalgues; electricitat, hidrogen gas, biodiesel, etc.
- L'alternativa més fàcil econòmica i tècnicament sobre l'ús de la biomassa és la generació d'energia elèctrica a partir de la combustió de les microalgues.
- La limitació més important per la construcció d'una planta és l'extensió del fotobiorreactor, i el conseqüent consum de territori i inversió inicial de construcció.
- La potència total produïda per les microalgues és de 180,98 W/m². D'aquesta només se'n pot aprofitar 3,532 W/m², la qual cosa proporciona una eficiència d'un 1.95%
- Per augmentar l'eficiència cal estudiar les unitats de procés de més consum energètic per tal de disminuir-lo, i proposar possibles alternatives.
- Cal seguir buscant millors microalgues que puguin oferir una major activitat fotosintètica, i per tant un aprofitament major de l'energia solar que la oferta per la *Chlorella sp.*

- És necessària la construcció d'una petita planta pilot per tal de fer assajos amb aquest model, i estudiar i conèixer millor alguns aspectes, com la capacitat de floculació de les microalgues o la possibilitat de treballar a major concentració d'algues els mesos de forta insolació.
- Creiem que tot i les limitacions tècniques, econòmiques i energètiques, la utilització del sistema de microalgues és viable a la nostra latitud.

Aquest estudi ha estat elaborat pel estudiants de la Llicenciatura de Ciències Ambientals de la Universitat de Girona:

Girona, 31 de Juliol de 2009

Marc Compte i Rovirola

Miquel Àngel Bauza i Riera

David Bota i Crespo

11. GLOSSARI

Absorbidor:

Els sistemes d'absorció són un divers grup de dispositius de control de la contaminació que poden ser utilitzats per eliminar alguns gasos de corrents de combustió industrials.

Biocombustible:

Terme amb el qual es denomina a qualsevol tipus de combustible que derivi de la biomassa - organismes recentment vius o els seus residus metabòlics.

Biodiesel:

Biocombustible fabricat a partir d'olis vegetals.

CGF:

Chlorella Growth Factor. Factor de Creixement de la *Chlorella*.

ECA:

Entitat Col·laboradora de l'Administració.

EDAR:

Estació Depuradora d'Aigües Residuals.

Electrofiltre:

Dispositiu per a la retenció de partícules contingudes en els gasos de combustió. Els gasos són sotmesos a un camp elèctric de gran intensitat que carrega elèctricament les partícules de pols. Aquestes són atretes, separades del gas i posteriorment eliminades.

Filtre de mànegues:

Dispositiu per a la retenció de partícules contingudes en els gasos de combustió. Són un dels equips més representatius de la separació sòlid - gas mitjançant un medi porós. Eliminen les partícules sòlides que arrastra una corrent gasosa fent-la passar a través d'un teixit.

Fotobiorreactor:

Reactor format principalment per un sistema de tubs transparents que permeten el pas de la llum. Dissenyat per la producció de cultius controlats de biomassa en suspensió, mitjançant la llum com a font energètica.

Metanització:

Procés de fermentació de forma controlada de la matèria orgànica.

PCI:

Poder Calorífic Inferior. Quantitat total de calor despresada en la combustió completa de 1 Kg de combustible.

Pla Territorial General de Catalunya:

PTGC. Instrument bàsic d'ordenació del territori de Catalunya, la seva planificació i definició de polítiques específiques de desenvolupament i reequilibri territorial. Va ser aprovat per la Llei 1/1995, de 16 de març. (Més info: <http://www10.gencat.net/ptop/AppJava/cat/plans/general/ptgeneral.jsp>).

Residus especials:

Aquells considerats perillosos i que necessiten d'un tractament especial.

Residus no especials:

Aquells no considerats perillosos i que no necessiten d'un tractament especial.

RSU:

Residus Sòlids Urbans.

SSG:

Sistema de Sanejament de Girona.

TRH:

Temps de Residència Hidràulic.

12. BIBLIOGRAFIA

Articles:

Vunjak-Novakovic G., Kim Y., Wu X., Berzin I., Merechuk J.C.; *Air-lift bioreactors for algal growth on flue gas: mathematical modeling and pilot-plant studies*. Ind. Eng. Chem. Res. (2005) 44: 6154-6163

Ranka Junge B.; *Possibilities and limits of wastewater-fed aquaculture*. University of Applied Sciences Waedenswil HSW

Chisti Y.; *Biodiesel from microalgae*. Biotechnology Advances 25 (2007) 294-306

Wang B., Li Y., Wu N., Lan C.Q.; *CO₂ bio-mitigation using microalgae*. Appl. Microbiol. Biotechnol. (2008) 79: 707-718

Grönlund E.; *Microalgae at wastewater treatment in cold climate*. Lulea University of Technology (2002).

Benemann J.R.; *CO₂ mitigation with microalgae systems*. Energy Convers. Mgmt. (1997) 38: 475-479

Gokhale S.V., Jyoti K.K., Lele S.S.; *Kinetic and equilibrium modeling of chromium (VI) biosorption on fresh and spent *Spirulina platensis/Chlorella vulgaris* biomass*. Bioresource Technology (2008) 99: 3600-3608

Aksu Z. *Determination of the equilibrium, kinetic and thermodynamic parameters of the batch biosorption of nickel(II) ions onto *Chlorella vulgaris**. Process Biochemistry (2002) 38: 89-99

Martínez Ma.E., Camacho F., Jimenez J.M., Espínola J.B.; *Influence of light intensity on the kinetic and yield parameters of *Chlorella Pyrenoidosa* mixotrophic growth*. Process biochemistry (1997) 32: 93-98

Watanabe Y., Saiki H.; *Development of a photobioreactor incorporating *Chlorella* sp. For removal of CO₂ in stack gas*. Energy Convers. Mgmt (1997) 38: 499-503

Sheehan J., Dunahay T., Benemann J., Roessler P.; *A look back at the U.S. Department of Energy's aquatic species program – Biodiesel from algae*. U.S. Department of Energy's Office of fuels development (1998)

Benemann J.R.; *Biofixation of CO₂ and greenhouse gas abatement with microalgae – technology roadmap*. U.S. Department of Energy (2003)

Travieso L., Benitez F., Weiland P., Sánchez E., Dupeyrón R., Dominguez A.R.; *Experiments on immobilization of microalgae for nutrient removal in wastewater treatments*. Department for Environmental Pollution Studies (DECA), National Centre for Scientific Research (CNIC), PO. Box 6990, Havana, Cuba (1995)

Laura Jimeno; *El alga Chlorella, sumamente eficaz para desintoxicar el organismo*. Discovery Salud. (2006)

Larsdotter K.; *Microalgae for phosphorus removal from wastewater in a Nordic climate*. Biotechnology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. (2006). ISBN: 91-7178-288-5.

Larsdotter K., La Cour Jansen J., Dalhammar G. ; *Biologically mediated phosphorus precipitation in wastewater treatment with microalgae*. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. (2007)

Hammouda O., Gaber A., Abdel-Raouf N.; *Microalgae and wastewater treatment*. Botany Department, Faculty of Science, and Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Cairo University, Egipt (1995)

Kiran L. Kadam; *Microalgae production from power plant flue gas: environmental implications on life cycle basis*. National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy Laboratory (2001)

Cobelas M.A., Gallardo T; *Dinàmica temporal de las microalgas de un tratamiento terciario de aguas residuales urbanas a escala de laboratorio*. Universidad Complutense

Benemann J.R., Van Olst J.C., Massingill M.J., Weissman J.C., Brune D.E.; *The controlled eutrophication process: Using Microalgae for CO₂ utilization an agricultural fertilizer recycling*. Agricultural & Biological engineering Dept., Clemson University

Richmond A., Tredici M., Rulkens W.H., Mur L.R.; *Microalgal photobioreactors: Scale-up and optimisation*. Wageningen University (2003)

Publicacions:

Departament de Benestar i Família, l'Ajuntament de Salt i la Universitat de Girona. *Salt?... Parlem-ne. Una aproximació a la realitat saltenca per projectar el futur* (2002)

Oficina d'Estudis Social i Europeus de Girona. *Agenda 21 local de Girona*. Ajuntament de Girona (2002)

Serra Muñoz M., Ubach Toniazzo X.; *Estudi de l'evolució dels nivells d'immissió dels contaminants emesos per la incineradora de Campdorà (Girona)*. Universitat de Girona (2008)

Adreces web:

http://www.ajuntament.gi/mediambient/qualitat_ambiental.php

<http://www.aeversu.com/>

http://www.aiguesdegirona.cat/html/adg/index_girona.html

http://mediambient.gencat.cat/cat/el_departament/sala_de_prensa/notes/NpPladirectorAcaGirones.jsp

<http://www.idescat.cat>

<http://www.viladesalt.org>

<http://www.ajuntament.gi>

<http://es.wikipedia.org/wiki/Girona>

<http://es.wikipedia.org/wiki/Salt>

http://es.wikipedia.org/wiki/Sarria_de_Ter

<http://www.chlorella.es/chlorella.html>

<http://www.modulor.de/shop/oxid.php/sid/979e5fb3c192940e06028527517199c5/cl/details/cnid/akc/anid/akca>

<http://www.comercioindustrial.net/productos.php?id=acr1&mt=acrilic>

<http://www.xtec.es/~jnogues%20/documents/75%20aniversari/memoria%20intalalacio%20energia%20solar.pdf>

<http://bvsde.per.paho.org/bvsacd/scan/027757/027757-08b.pdf>

[http://www.autoprofesional.com/html/files/pdf/amb/iq/403/15articul
oJun.pdf](http://www.autoprofesional.com/html/files/pdf/amb/iq/403/15articul
oJun.pdf)

http://mediambient.gencat.cat/Images/43_25058.pdf

<http://slyfilters.com/pdf/WetScrubber.pdf>

[http://www.dinamec.com.co/pdf/6.%20Aireadores%20sumergibles/v
enturi%20jet.pdf](http://www.dinamec.com.co/pdf/6.%20Aireadores%20sumergibles/v
enturi%20jet.pdf)

http://www.mikropul.com/products/pdf_files/wetscrubbers.pdf

http://www.tesisexarxa.net/TDX-0926101-085613/index_cs.html

[http://www.arc-cat.net/es/publicacions/pdf/normativa/catalana/lleis/
llei_11_2000.pdf](http://www.arc-cat.net/es/publicacions/pdf/normativa/catalana/lleis/
llei_11_2000.pdf)

[http://www.arc-cat.net/es/publicacions/pdf/normativa/europea/direct
ives/dir_2000_76.pdf](http://www.arc-cat.net/es/publicacions/pdf/normativa/europea/direct
ives/dir_2000_76.pdf)

[http://www.arc-cat.net/es/publicacions/pdf/normativa/espanyola/rd/r
d_653_2003.pdf](http://www.arc-cat.net/es/publicacions/pdf/normativa/espanyola/rd/r
d_653_2003.pdf)

[http://www.arc-cat.net/es/publicacions/pdf/normativa/catalana/decre
ts/decret_323%20_1994.pdf](http://www.arc-cat.net/es/publicacions/pdf/normativa/catalana/decre
ts/decret_323%20_1994.pdf)

http://icv-euia-girona.blogspot.com/2009_06_01_archive.html

<http://www.webgipal.net/salt/ajuntament/linkats.asp?Id=8870>

[http://www.laregion.es/noticia/37405/Lousame/compostaje/residuos/
urbanos/presencia/contaminantes/](http://www.laregion.es/noticia/37405/Lousame/compostaje/residuos/
urbanos/presencia/contaminantes/)

<http://www.xtec.es/esc-cefax/Ciencias/vidamar/plancton.htm>

<http://www.kmpt.com>

<http://www.iuexiste.es>

13. ANNEXES