

PROCESO HEVA: ECONOMIA CIRCULAR QUE INTEGRA LA MINERIA E INDUSTRIA CON LA AGRICULTURA Y ACUICULTURA

Carlos Villachica León
Joyce Villachica Llamosas
Jaime Llamosas Bueno
Leslye Villachica Llamosas
Smallvill s.a.c. – Consulcont s.a.c.

1.0 RESUMEN

Durante 3 milenios la industria de Cal y Cemento ha utilizado la combustión como fuente de energía térmica y temperaturas mayores a 1,100°C en hornos abiertos, emitiendo por ello 1.3 T CO₂ por cada T de Cal o Cemento, a concentraciones menores que 10% CO₂ que hacen inviable su aprovechamiento. El avance tecnológico en esta industria se ha centrado en el diseño de hornos cada vez más grandes y en la mecanización y automatización de la operación pero no ha modificado el sistema de calentamiento a uno que no utilice combustible.

El Proceso peruano HEVA por el contrario utiliza un Reactor Cerrado que opera al vacío calentado eléctricamente para obtener la Cal a menos de 800°C, y capturar el CO₂ concentrado y limpio que genera la calcinación del carbonato.

El Proceso HEVA ya alcanzó el nivel de desarrollo para la producción industrial de Cal y Cemento sin emisión de CO₂, con menos energía y mayor rentabilidad que el proceso convencional; su plena aplicación podría evitar la emisión responsable del 8% del Calentamiento Global. Para lograr esta plena aplicación es necesario fomentar la utilización de este CO₂ en la producción masiva de alimentos y biomasa en general por medio de Fotosíntesis y Fertilización Carbónica.

La producción de biomasa ocurre vía fotosíntesis con el CO₂ como elemento fundamental; en medio acuático para producir microalgas de acuerdo a:



y en medio ~~terrestre~~ acuático para producir microalgas de acuerdo a:



El Proceso HEVA puede suministrar CO₂ de calidad comercial a menos de 200 US\$/T comparado con 800-1,000 US\$/T del mercado nacional, y así impulsar el incremento de la productividad de cultivos acuáticos y terrestres. La producción de microalgas a partir del CO₂ HEVA incrementa 24 veces el valor agregado con respecto a la Cal convencionalmente obtenida y es probablemente la mejor opción económica para aprovechar esta oferta de CO₂; las microalgas tienen un alto valor nutritivo, numerosas aplicaciones y una productividad exponencial inalcanzable por otras especies a altas dosis de CO₂.

Si bien a nivel global se utiliza el CO₂ de los sistemas de calefacción o termoeléctricas como insumo barato, el producto no es aceptable para consumo humano.

La Fertilización carbónica de plantas se practica desde 1960, especialmente en países de clima frío con agricultura protegida (invernaderos); países más tropicales no disponen de CO₂ barato porque no utilizan calefacción. La disponibilidad del CO₂ HEVA abre una gran oportunidad para incrementar la productividad de cultivos en las 3 regiones del Perú de la mano de la producción minera que consume la Cal.

El efecto positivo de la fertilización carbónica en invernadero está ampliamente acreditado con incrementos productivos de 14 a 61% para niveles de CO₂ 700-900 ppm; en nuestro país los incrementos pueden ser mayores cuando consideramos que en la región alto andina el nivel natural de CO₂ es solo 270 ppm comparado con 430 ppm CO₂ a nivel de mar. En opinión de los autores este factor es el principal responsable de la baja productividad agrícola (y acuícola) que influye también en los niveles históricos de pobreza y desnutrición de esta región. Por ello debiera recibir la máxima atención para aprovechar el CO₂ HEVA que estará disponible en el corto plazo.

El 100% de la energía utilizada por Proceso HEVA es eléctrica, que en el Perú tiene un precio bajo y decreciente; ello garantiza un futuro estable para las actividades que dependan de sus productos.

Si toda la Cal demandada por la Minería Peruana fuera obtenida con el Proceso HEVA, evitaríamos la emisión de 3.2 millones de T/año y el CO₂ capturado podría generar 1 millón de T/año de microalgas valorizadas en 4.1 mil millones US\$/año. Aproximarse a esta meta, potenciando también el cultivo terrestre en todo el país, requiere la participación plena de nuestras Universidades, Instituciones y Empresas que cuentan con recursos humanos, recursos económicos e infraestructura para proyectos de I+D+i.

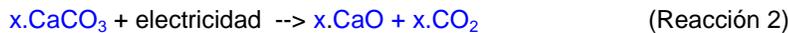
2.0 EL PROCESO HEVA

Durante 3 milenios la industria de Cal y Cemento ha utilizado la combustión como fuente de energía térmica y temperaturas mayores a 1,100°C, emitiendo por ello 1.3 T CO₂ por T de Cal o Cemento, en gas con concentraciones menores a 10%CO₂ que hacen inviable su aprovechamiento. El Proceso HEVA utiliza un Reactor al Vacío calentado eléctricamente para obtener la Cal a menos de 800°C, y capturar el CO₂ concentrado y limpio que genera la calcinación del carbonato utilizado como única materia prima.

Proceso Convencional de Obtención de Cal



Proceso HEVA de Obtención de Cal



El beneficio ambiental es de gran magnitud porque se captura al mayor responsable del Cambio Climático.

Hay un gran impacto económico, se generan 2 productos comerciales de alta calidad, Cal con 96% CaO y CO₂ con mas de 95% pureza, en proporciones similares (56 y 44% del peso de la Caliza original) y precios de 210 y 840 \$/T, respectivamente. La figura 1 muestra un balance de masa comparativo para 100 T/d de Cal.

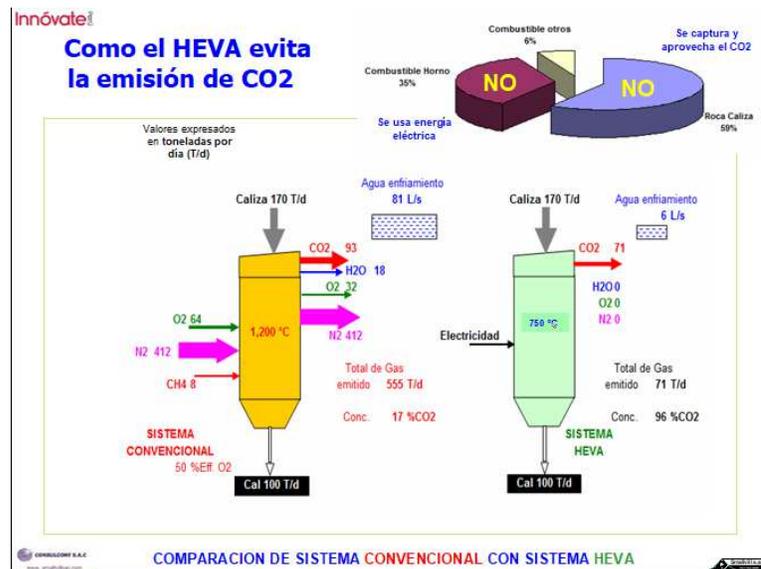


Figura 1. Balance comparativo de proceso convencional y HEVA de producción de Cal

Con el bajo precio de energía eléctrica en Perú (25\$/MWh) y producción simultánea de CO₂, el costo equivalente de producción de Cal oscila entre 6 y 26 \$/T, a 800 y 100 \$/T CO₂, frente a precio de 210 \$/T de Cal. Vale decir que se podría suministrar CO₂ al mercado peruano a solo 100 \$/T sin arriesgar la rentabilidad de la producción de Cal (y Cemento).

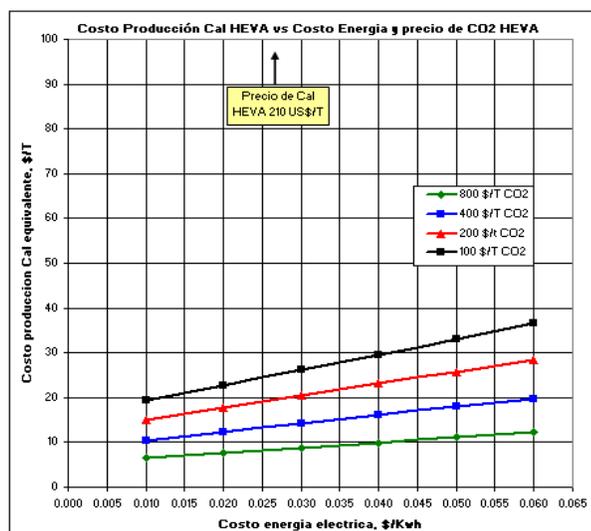


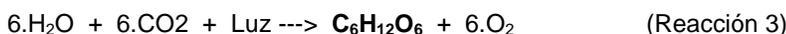
Figura 2. Costo de producción equivalente de Cal versus costo de energía y precio CO₂

El Consumo de Cal de la Minería Peruana supera los 2.5 millones T/año y sigue creciendo; la producción simultánea de CO₂ que el Proceso HEVA lograría es 2.0 millones T/año que no tienen demanda en la actualidad. La industria de bebidas gaseosas consume 16,000 T/año, es decir apenas el 0.8% de la producción posible.

El éxito ambiental de esta innovación está entonces supeditado a la producción de alimentos y biomasa en general mediante Fotosíntesis y “Fertilización Carbónica”.

La generación de biomasa, como la vida misma, ocurre mediante fotosíntesis:

En medio acuático (generación de microalgas)



En medio terrestre (generación de celulosa)



La tasa de crecimiento de estas especies, como cualquier reacción química, está controlada por la concentración del componente menos abundante que a nivel global resulta ser el CO₂¹ con una concentración atmosférica al nivel del mar de 430 ppm (0.043%). El recurso agua es abundante en muchos lugares y se puede transportar donde no abunda, la luz solar es suficiente durante el día en todas las latitudes, y se puede generar, transportar y almacenar en horas de sombra a costo relativamente bajo gracias a la energía solar.

2.0 PRODUCCION DE BIOMASA EN MEDIO ACUATICO

La extraordinaria fauna marítima tiene como base de la cadena alimenticia a las microalgas y si bien se genera con la absorción de CO₂ atmosférico y penetración limitada de luz solar, estas condiciones no muy favorables se compensan con el inmenso volumen de agua, y también con contribución de emanaciones volcánicas subterráneas que desprenden CO₂.

Entonces para alcanzar tasas de producción comerciales se requiere un gran volumen de agua cuando se utiliza aire con 430 ppm de CO₂; por ello los centros mas avanzados de producción (Foto 1) utilizan CO₂ comercial (99.9%CO₂) para el crecimiento de microalgas.

¹ Paradójicamente los actuales niveles de CO2 en la atmósfera son excesivos y promueven el calentamiento global pero en modo alguno afectan, directamente, el crecimiento de la biomasa.



Foto 1. Vista de una piscina “raceway” de cultivo industrial de microalga con inyección de CO₂ comercial en las instalaciones del Proyecto SABANA de la Unión Europea, Almería, España. Izquierda: en ambiente exterior. Derecha: dentro de un Invernadero en construcción.

Con inyección de CO₂ concentrado la masa de microalgas se duplica cada 24 horas sometidas a luz permanente², un cultivo de 100 gramos puede crecer a 12 Kgs en una semana; en la práctica y una vez alcanzada la fase estacionaria (1-5 Kg/m³), diariamente se retira 20-30% del volumen que se centrifuga y deshidrata para el consumo.

En teoría (reacción 3) se generan 0.68 Kg de microalga (C₆H₁₂O₆) por Kg de CO₂; en la práctica se reporta un ratio más conservador de 0.40-0.50 Kg microalga/Kg CO₂³.

En SMALLVILL se ha priorizado el uso del CO₂ HEVA para producción de microalgas (Fotos 2 y 3) en vista de la alta productividad en términos de tiempo, volumen de agua y área de terreno, su gran valor nutritivo y las ventajosas condiciones que ofrece el Perú en sus 3 regiones. La tasa de crecimiento de microalga Espirulina con CO₂ HEVA fue similar a la lograda con CO₂ comercial en IMARPE⁴ (Figura 3) con nivel de proteínas de 47 y 61% que armonizan con las concentraciones utilizadas en cada caso (Villachica, 2017).



Cultivos de Microalgas en el Laboratorio de SMALLVILL utilizando el CO₂ obtenido en el proceso especial de Calcinación y producción de Cal.

Foto 2. Cultivos de microalga Espirulina y Scenedesmus con CO₂ HEVA. Laboratorio Smallvill

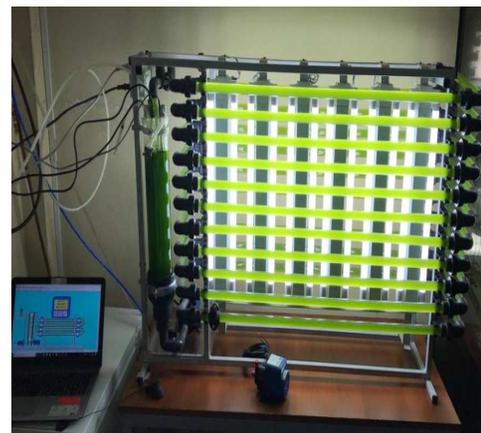


Foto 3. Fotobioreactor de flujo continuo con cultivo de Espirulina. Lab Smallvill

² En realidad la aplicación de luz se detiene periódicamente para evitar estresar a las microalgas.

³ Parámetro utilizado en el proyecto SABANA de la Unión Europea. Otros insumos utilizados en muy pequeña proporción son los nutrientes (nitratos, fosfatos, manganeso, calcio, otros).

⁴ IMARPE, Instituto del Mar del Perú, asociada de SMALLVILL en el Proyecto 151-2016 de Innóvate Perú

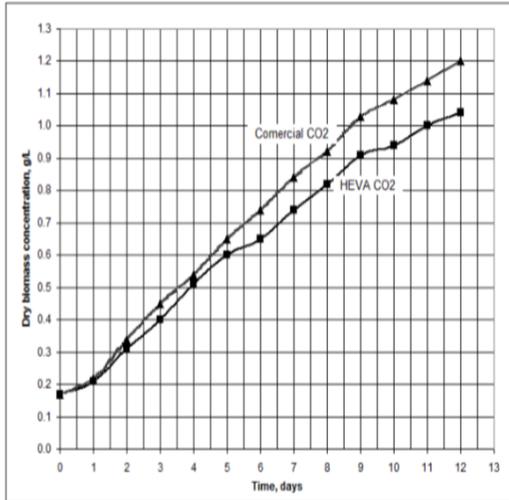


Figura 3. Cultivo comparativo de microalga *Espirulina* con CO₂ Comercial y HEVA

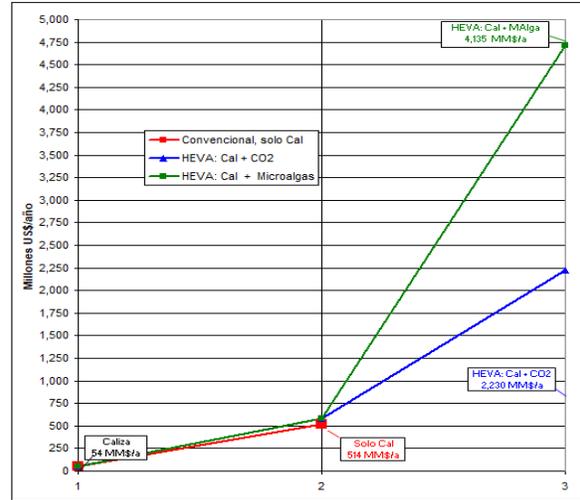


Figura 4. Potencial del Valor agregado con y sin la aplicación de la tecnología HEVA

En términos económicos el potencial productivo que ofrece la tecnología HEVA a partir del consumo de Cal minera se muestra en las figuras 4.

La demanda anual de Cal minera requiere 4.5 millones de T de Caliza valorizados en 54 millones US\$, que procesados convencionalmente generan 2.9 millones T de Cal con valor de 514 millones US\$ y una gran emisión contaminante de CO₂. El tratamiento HEVA genera 2.5 millones T de Cal de mejor calidad con valor de 580 millones US\$ y 2.0 millones T de CO₂ con un valor de 1,650 millones US\$, además de evitar la contaminación.

En teoría la conversión de este CO₂ a microalga⁵ con precio de 4.21 US\$/Kg generaría un ingreso anual de 4,135 millones US\$ (Figura 4). Si bien estas cifras se refieren a una conversión total del actual sistema de fabricación de Cal, no es menos cierto que una aplicación progresiva de la tecnología HEVA tendría un éxito económico y ambiental relevante, especialmente si el CO₂ obtenido se convierte en microalga.

A nivel global el esfuerzo más importante para desarrollar aplicaciones comerciales de la microalga es el Proyecto SABANA que está en su fase final de implementación en Almería, España y es dirigido por el Dr. G. Acien (Foto 1). Persigue aplicaciones como biofertilizantes, bioestimulantes y biopesticidas para el sector agrícola, alimentación acuícola, animal y humana, y aminoácidos para biodiesel, bioplásticos y usos similares. Mención especial son betacarotenos y medicinales de muy alto valor. (Acien, 2016).

3.0 PRODUCCION DE BIOMASA EN MEDIO TERRESTRE

El carbono es el principal elemento para la vida; constituye 40-50% de la materia seca de los organismos vivos (Levanon y col., 1986) Las plantas lo adquieren del ambiente en forma de CO₂; este entra en la planta a través de las estomas (poros) situados en la superficie foliar y es asimilado en la forma de carbohidratos y otras sustancias. Normalmente la tasa de asimilación de CO₂ está limitada por la cantidad (concentración) de CO₂ presente en el entorno de la planta (Reacción 4). Por ello la asimilación y por tanto el crecimiento del cultivo y la producción pueden acelerarse mediante un aporte adicional de CO₂ en el aire circundante (Sánchez-Guerrero, M. y col., 2010).

⁵ Según ADUANAS las microalgas importadas durante los años 2014, 2015 y 2016 reportaron un precio CIF promedio de 11.99 US\$/Kg. El menor precio CIF reportado fue 4.21 US\$/Kg pero también se reporta venta masiva a 1-2 US\$/Kg.

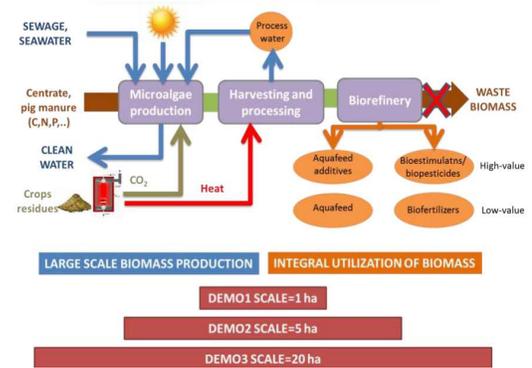
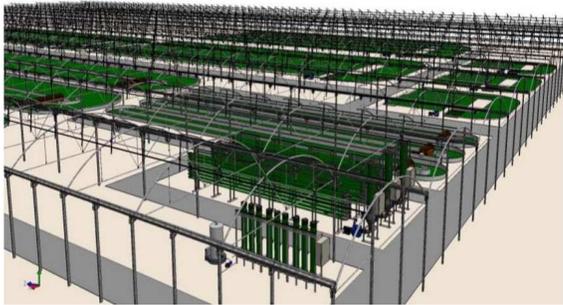


Figura 5. Vista de las instalaciones de 1 Has del Proyecto SABANA en fase constructiva final⁶

Figura 6. Diagrama de flujo del Proyecto SABANA, Universidad Almería, España

El incremento de la concentración de CO₂ se logra en ambientes semicerrados como invernaderos; el desarrollo de la tecnología necesaria para la aplicación de CO₂ permitió su rápida aplicación en el centro y norte de Europa y en EEUU a partir de 1960 (Wittwer, 1986). En países de clima frío de Europa el uso habitual de calefacción proporciona una fuente barata, aunque no muy limpia de CO₂; este uso ha resultado en un claro incremento en rendimiento y calidad de cultivos hortícola y ornamentales (Nederhoff, 1984; Baker y Van Holsteinj, 1995). Los países cálidos no disponen de esta fuente barata; el alto precio del CO₂ comercial y compromiso con el sistema de ventilación ha limitado esta aplicación en el pasado pero el desarrollo tecnológico en control del clima va superando estas limitaciones.

El efecto positivo de la fertilización carbónica sobre crecimiento y producción en invernadero está ampliamente demostrado (Enoch y col. 1976; Nederhoff y Schapendonk, 1985; Snack y Hand, 1985), con incrementos productivos de 14 a 61% (Kimball, 1983) para niveles de 700-900 ppm CO₂. La tabla 1 muestra los resultados obtenidos con altos niveles de CO₂ con y sin calefacción, en cultivos realizados en el IFAPA⁷ de Almería, España.

Tabla 1. Resultados de Fertilización Carbónica en IFAPA La Mojonera, Almería, España

Cultivo	Tipo de Invernadero	Calefacción CO2/Testigo	CO2, max ppm	Incremento de Producción, %
Pepino Otoño ¹	Multitúnel	No/No	700	17
Pepino Otoño ¹	Parral Mejorado	Si/Si	600	26
Pepino Otoño ¹	Parral Mejorado	Si/No	600	56
Judía Primavera ¹	Parral	No/No	600	12
Judía Otoño ¹	Parral	No/No	600	17
Judía Primavera ²	Parral Mejorado	Si/No	600	20
Pimiento Otoño ³	Multitúnel	No/No	750	19
Pimiento Otoño ⁴	Venío	No/No	800	25
Pimiento Primavera ⁵	Multitúnel	No/No	750	22
Tomate Cherry ⁶	Multitúnel	No/No	700	15

¹ Sanchez-Guerrero (1999); ² Lorenzo y col. (1997); ³ Alonso y col. (en prensa); ⁴ Muñoz y hurí (2005); ⁵ IFAPA (datos no publicados)

⁶ SABANA, Proyecto de la Comunidad Europea que significa Sustainable integrated Algae Biorefinery for the production of bioactive compounds for Agriculture and Aquaculture

⁷ IFAPA= Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de España.

El enriquecimiento carbónico también contribuye a la eficiencia del uso de agua (EUA) y en experiencias realizadas en invernaderos multitúnel en IFAPA se han logrado incrementos en la EUA desde 19 a 41% (Sánchez-Guerrero, M. 1999; Rull, 2005; Baba y col., 2006).

SMALLVILL realizó cultivos de rabanito con atmósfera de 850 ppm de CO₂ en invernaderos climatizados reportando incrementos en la tasa de crecimiento de 36 a 42% (Figura 7).

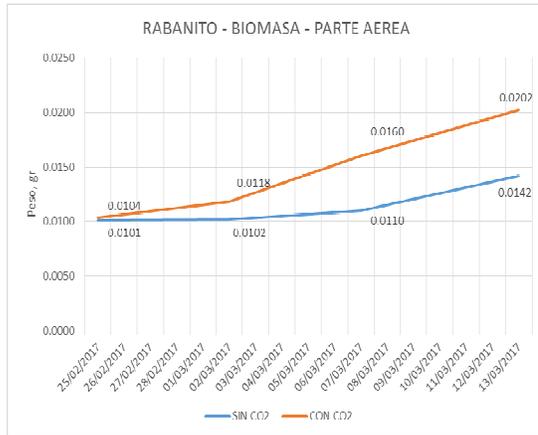


Figura 7.a. Crecimiento comparativo, biomasa aérea de rabanito con 430 y 850 ppm de CO₂

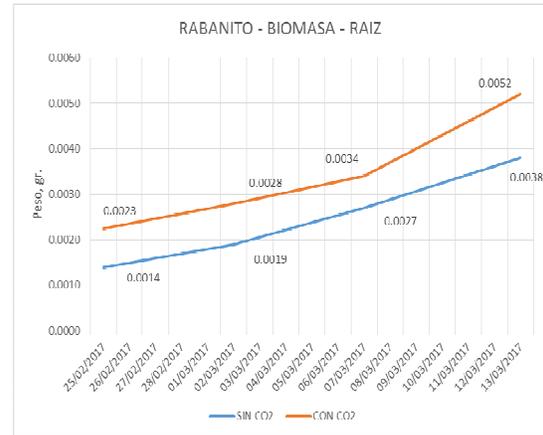


Figura 7.a. Crecimiento comparativo, biomasa raíz de rabanito con 430 y 850 ppm de CO₂

El 70% del consumo europeo de alimento fresco proviene de 60 Km² de invernaderos en Almería, España, relevando su importancia económica (Foto 4); el CO₂ se aplica para evitar que su nivel disminuya pues debajo de 250 ppm la productividad cae hasta en 20%.



Foto 4.a. Invernadero con cultivo protegido de tomates e inyección de CO₂ en Almería



Foto 4.b. Invernadero con cultivo protegido de flores e inyección de CO₂ en Almería

4.0 FOTOSINTESIS LIMITADA POR LA ALTITUD Y DISPONIBILIDAD DE ENERGIA ELECTRICA EN EL PERU

La concentración de CO₂ en peso (ppm) disminuye junto con la densidad del aire conforme se incrementa la altitud (Figura 8.a); es una situación natural que limita severamente la productividad en una región que cubre 40% del territorio nacional y tiene un alto nivel de pobreza. Históricamente se ha atribuido esta baja productividad al clima frío, escasez estacional de agua, suelo de baja calidad y otros, ignorando la importancia de la concentración de CO₂ que es un factor fundamental acreditado por numerosos testimonios.

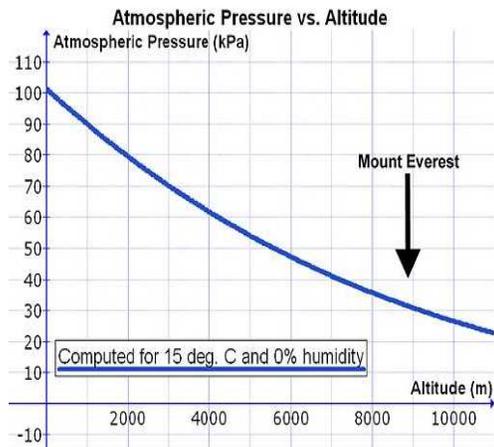


Figura 8.a. Variación de la densidad del aire y concentración de CO₂ con la altitud

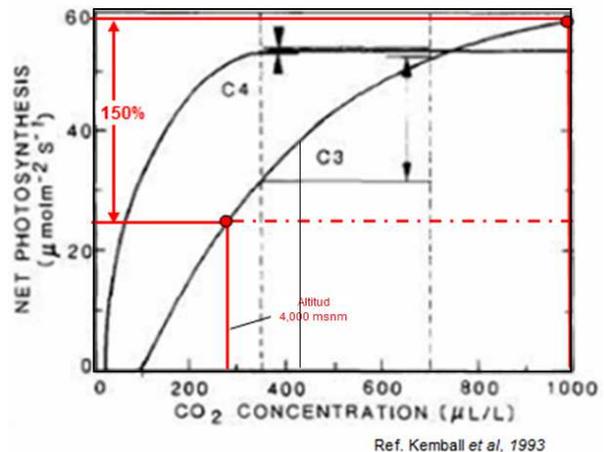


Figura 8.b. Tasa de Fotosíntesis en función de la concentración en volumen de CO₂

A los 4000 msnm que distingue nuestra región alto andina, la densidad del aire y la concentración de CO₂ disminuyen a 60% de su valor al nivel del mar, es decir solo 258 ppm comparado con 430 ppm de CO₂. Por otro lado Kemball y colegas (1993) establecen la tasa de fotosíntesis (crecimiento) que experimentan las plantas tipo C4 y C3 en función de la concentración de CO₂ y en la figura 8.b la tasa de crecimiento de plantas C3 con 1,000 μL/L CO₂ es el doble del obtenido a nivel del mar (380 μL/L CO₂) y el triple del obtenido a 4,000 msnm; ello indica que la Fertilización carbónica aplicada en altitud tiene el potencial de incrementar notablemente la productividad de los cultivos. No debe extrañar por ello que el INIA de Perú lograra en la Costa una producción de Quinua 3 veces mayor que la del altiplano puneño (RPP, 2013).

Con la tecnología HEVA y la producción local de Cal y CO₂ se podría superar esta situación endémica porque este recurso estaría disponible a precios hasta 8 veces menores al precio comercial y no requeriría transporte lejano ni almacenamiento especializado del gas. La Cal generada simultáneamente abastecería a los Centros Mineros de la región.

Las plantas tipo C4 (figura 5.b) son indiferentes a un incremento de la concentración de CO₂ por encima de la existente al nivel del mar, pero son escasas (maíz, caña de azúcar y sorgo, entre otros). Por el contrario las plantas C3 constituyen más del 90% de las especies conocidas (papa, trigo, quinua, lechuga, pepino, fresa, etc.) siendo por ello necesario una participación masiva de instituciones e investigadores para optimizar la Fertilización carbónica para este universo.

El bajo costo de energía eléctrica (25 US\$/MWh) aunado a una tecnología que utiliza 100% de electricidad para operar, la gran disponibilidad de Caliza y alta demanda de Cal minera en todo el territorio nacional son factores que convierten a nuestro país en un competidor formidable para el aprovechamiento del CO₂ HEVA en la producción agrícola y acuícola.

Para que ello sea posible proponemos integrar al sistema de I+D+i de las Universidades Peruanas, especialmente las de regiones andinas en torno a la tecnología HEVA pues nuestra gran variedad de especies cultivables hacen imposible que una sola institución logre esta tarea en el corto tiempo que demanda la competencia del Mundo globalizado.

5.0 DESARROLLO ALCANZADO DE LA TECNOLOGIA HEVA

El desarrollo de esta tecnología se inició con pruebas de laboratorio y fue seguido con pruebas en una unidad piloto semicontinua de 7 Kgs de capacidad, integrada con sistema de enfriamiento y compresión-almacenamiento del CO₂ (Foto 6). El CO₂ HEVA así obtenido fue utilizado para cultivos de microalgas en probetas y matraces y luego en un fotobioreactor continuo de 10 litros de capacidad controlado con un computador. Se realizaron cultivos de las especies Chlorella, Scenedesmus y Spirulina (Fotos 2 y 3, Figura 3).

De igual modo el CO₂ HEVA fue utilizado para fertilización carbónica en invernaderos con control de clima, humedad, luz y concentración de CO₂, y especies como rabanito, lechuga, alcachofa, ciprés, olivo y molle.

El diseño industrial de un Horno HEVA continuo fue realizado en Alianza con una firma europea de alta tecnología para una capacidad de 30 T/d (Foto 7). Con los datos de Capex y Opex de la Planta integrada con sistema de enriquecimiento a 99.9%CO₂, compresión, licuación y envasado, se estableció la viabilidad económica del proyecto para venta de Cal HEVA de 96%CaO y de CO₂ HEVA de 99.9% pureza a 210 y 200 US\$/T, respectivamente. El Capex y Opex resultantes fueron 3.56 millones US\$ y 34.14 US\$/T Caliza.

El proyecto genera una tasa interna de retorno (TIR) de 49.64% frente al 10% bancario, 2.3 años para pago de inversión, y utilidad anual de 1.8 millones US\$, confirmando su rentabilidad y que es una fuente sostenible y barata de CO₂ para agricultores y acuicultores.



Figura 6. Vista del Reactor HEVA Piloto de flujo semicontinuo (7 Kg capacidad)



Figura 7. Vista de un Reactor HEVA de Flujo continuo de 30 T/d de capacidad

6.0 CONCLUSIONES

1. El Calentamiento global es el mayor problema ambiental que enfrenta el Mundo y es ocasionado por el CO₂ que emiten diversas actividades económicas. En el Perú nuestra Minería, base de nuestro desarrollo económico, consume alrededor de 2.5 millones TM/año Cal que en su fabricación emiten 3.3 millones TM/a de CO₂. perjudicando el ambiente. La industria cementera emite 3.5 veces mas.
2. La Cal y el Cemento se fabrican desde hace 3 milenios utilizando combustible para la descomposición térmica del carbonato. Lo hacen en reactores abiertos, a más de 1,100°C y generando gases con tan baja concentración de CO₂ que su captura y aprovechamiento económico es inviable.
3. El proceso peruano HEVA es un cambio tecnológico radical que realiza la Calcinación en un reactor cerrado, a presión negativa, calentado eléctricamente a menos de 800°C y captura la totalidad del CO₂ emitido por la roca con una concentración superior al 95%. El CO₂ se utiliza en diversas aplicaciones pero en países avanzados se aprovecha como fertilizante carbónico para incrementar la tasa de crecimiento de plantas y microalgas vía fotosíntesis; es decir para la producción masiva de alimentos.
4. El alto precio del CO₂ comercial limita esta aplicación especialmente en países donde como en el Perú se cotiza a más de 850 U\$/T. Una Planta HEVA pequeña puede suministrar CO₂ a solo 200 US\$/T generando todavía una alta rentabilidad (TIR 49.6%) gracias a la venta paralela de Cal de calidad que consume nuestra Minería.
5. La baja productividad agrícola de la región andina, derivada de la también baja concentración de CO₂ respecto al nivel del mar, puede ser radicalmente incrementada con la disponibilidad de CO₂ HEVA barato aplicado en invernaderos. Una aplicación

similar para cultivo de microalgas tiene el potencial de generar biomasa valorizada en 4,000 millones US\$/año. Ambas aplicaciones reducirían drásticamente los niveles de pobreza y desnutrición de esta importante región y convertirían a nuestra Minería en un aliado natural de la agricultura, acuicultura y de las Comunidades.

6. Si bien la tecnología HEVA y sus aplicaciones han alcanzado un desarrollo maduro, es necesario que el sistema de I+D+i de las Universidades Peruanas, especialmente andinas, oriente sus recursos humanos, económicos e infraestructura para aprovechar el recurso CO₂ que la tecnología HEVA ofrece. La multitud de especies que responde favorablemente a la Fertilización Carbónica demanda también una participación masiva de Instituciones, Empresas e investigadores para lograr metas que beneficien al país en el corto plazo.

7.0 AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen por el apoyo financiero brindado por la institución Innóvate Perú, y también por Concytec, para el desarrollo de la Tecnología HEVA.

8.0 REFERENCIAS

1. Acién, G. 2016, Sustainable integrated Algae Biorefinery for the production of bioactive compounds for Agriculture and Aquaculture (SABANA). AlgaEurope 2016 Conference, Madrid (Spain).
2. Aguilar, C. et al, Determination of microalgae biomass with potential to accumulate lipids to obtain fuel". Handbook published by IMARPE, Peruvian Ocean Institute, 2011.
3. Avila, I. et al, Thermal decomposition kinetics of Brazilian limestones: effect of CO₂ partial pressure". Journal of Environmental Technology, pp 1175-1182. (2011).
4. Baba y col., 2006, Agronomic response of sweet pepper (*Capsicum annum L.*) to CO₂ enrichment in greenhouses with static ventilation. Acta Horticulturae 719:521-528.
5. Bakker y Van Holsteinj, 1995, Greenhouse construction and equipment. Greenhouse Climate Control. Wageningen Pers. P. 185-194.
6. Balaz, P., 2000, Extractive metallurgy of activated minerals. Elsevier, Amsterdam, 2000
7. Bellamy, B.A. and Kimball, B.A. 1986, CO₂ enrichment duration and heating credit as determined by climate. In: Carbon Dioxide Enrichment of Greenhouses Crops. Vol II. P. 167-197.
8. Burns, A. 2014, Photobioreactor design for improved energy efficiency of microalgae production. Tesis Master, California Polytechnical University, USA, 180 pp
9. Céspedes, A.J. et al, 2009, Caracterización de la explotación hortícola protegida de Almería. IFAPA, Almería, España.
10. Enoch y col. 1976, CO₂ enrichment of strawberry and cucumber plants grown in unheated greenhouses in Israel. Scientia Horticulturae 5:33-41.
11. Fennell, P; Ben, A., Calcium and chemical looping technology for Power Generation and Carbon Dioxide (CO₂) Capture". Woodhead Publishing Series in Energy, 82, Elsevier.
12. Green Climate Fund, Status of Pledges and Contributions made to the Green Climate Fund. Retrieved 17 May 2017.
13. Jos, O et al, Trends in global CO₂ emissions" 2012 Report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Publication number 500114022. La Hague/Bilthoven, 2012.
14. Kimball, 1983, Carbon dioxide and agricultural yield - an assemblage and analysis of 430 prior observations. Agronomy Journal 75:779-788.

15. Levanon y col., 1986, Organic materials degradation for CO₂ enrichment of greenhouse crops. In: Enoch, H. y Kimball, B. (Eds). Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops. Volume I: Status and CO₂ sources. CRC Press Inc., Florida, p. 123-145.
16. Lide, D. R., ed. 2005, CRC Handbook of Chemistry and Physics (86th ed.). Boca Raton (FL): CRC Press. ISBN 0-8493-0486-5.
17. Lorenzo, P. et al, 1990, CO₂ in plastic greenhouse in Almería (Spain), *Acta Horticulturae* 268: 165-169.
18. Mucsi, G. et al, Mechanical activation of cement in stirred media mill". *Powder Technology*, 235, pp 163-172. (2013).
19. Natural Resources of Canada, 2001, Energy Consumption Benchmark Guide: Cement Clinker Production, 2001. 2 pp.
20. Nederhoff, E, Schapendonk, A, 1985, Effects of environmental conditions on growth and production of cucumber: comparison between empirical and simulation data. *Acta Horticulturae* 174:251-258.
21. Nederhoff, E., 1984, Light interception of a cucumber crop at different stages of growth. *Acta Horticulturae* 148:525-534.
22. RPP Noticias, 2013. Ministro de Agricultura Milton Von Hesse declara (01.11.13), que el INIA logró en la Costa cosechas de Quinua de 4 TM/Ha vs. 2 TM/Ha en Puno y Ayacucho.
23. Rull, S, 2005, Influencia del enriquecimiento carbónico sobre la productividad, la eficiencia hídrica y la absorción de nutrientes de un cultivo de pepino en sustrato. Proyecto fin de carrera. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Almería. Pp 90.
24. Sánchez-Guerrero, M et al, 2010, Manejo del Clima en el Invernadero Mediterráneo. IFAPA, INIA, España. 83-98.
25. Sánchez-Guerrero, M. 1999, Enriquecimiento carbónico en cultivos hortícolas bajo invernadero de polietileno. Tesis doctoral, 266 pp.
26. Sekulica, Z. et al, 1999, Mechanical activation of cement with addition of fly ash". *Material Letters*, 39, pp 115-121. 1999.
27. Slack, G y Hand, D. 1985, The effect of summer CO₂ enrichment and ventilation temperatures on the yield, quality and value of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science* 60:507-516.
28. Taylor, H. 2004, "Cement chemistry", Thomas Telford Publishing. pp 1-439. (2004)
29. Tian, L. et al 2012, Study of limestone thermal decomposition in O₂/CO₂ atmosphere" *Cleaner Combustion and Sustainable World*, pp 1283-1289. (2012).
30. Villachica, C y Villachica, J, 2017, Technology development for strong reduction of energy consumption and CO₂ emission in lime and cement manufacture.
31. Wittwer, S. 1986, Worldwide status and history of CO₂ enrichment-an overview. In: Carbon Dioxide Enrichment of Greenhouses Crops. Vol I. Enoch, H. y Kimball, B. (Eds). CRC Press Inc., Florida, p. 3-15.

00000000