



**UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

***TECNOLOGÍAS APROPIADAS PARA UN
DESARROLLO SOSTENIBLE***

Presentado por:

Rafael Muñiz Alvarez

Trabajo de Ascenso
Para optar a la categoría de Profesor Asociado

Caracas Julio de 2019

Indice

Agradecimientos

1. Introducción	1
1.1 Hacia una tecnología ambientalmente sostenible	1-5
1.2 Las tecnologías apropiadas: un aporte al desarrollo de las naciones de menores Recursos	5-9
2. Estructura del trabajo	9-16
3. Conclusiones	16-19
4. Referencias	19-21
5. Publicaciones	22

Agradecimientos

Traigo a colación una frase que repetía con mucha frecuencia el Hermano Ginés “Nadie se salva solo”. El fue el visionario y motor que ideó, fundó y presidió por muchos años desde su creación la Fundación La Salle de Ciencias Naturales. Al igual que la frase de Ginés este trabajo no es de una sola persona aunque yo sea el responsable de su contenido y presentación.

Quiero expresar mi gratitud en primer lugar a mi esposa Yolanda López que no solo me animó y acompañó en la realización de este trabajo sino que fue mi asidero en los momentos más difíciles.

A mis compañeros del CIDI la Dra. María Isabel López quien es su actual Directora , la Dra. Beatriz Soledad y el Ing.(MSc) Heriberto Echezuría a quienes agradezco además de sus consejos fruto de sus amplios conocimientos y de su experiencia el que fueron los amigos que me dieron mucho más convenciéndome de que mi proyecto era factible y viable y que llegaría con éxito a puerto seguro

A mis ángeles de la guarda nuestros asistentes de investigación del CIDI Anais Mota, Bridihen Alvarado y Fernando Martínez por todo el apoyo técnico que me dieron con este trabajo y con los artículos publicados.

Al Ing. Javier Barros y al TSU César Criollo que fueron los magos que resolvieron con pericia los numerosos problemas técnico que surgieron durante el desarrollo experimental.

A los revisores de los artículos de la Revista Tekhné por su acuciosa labor Al laboratorio de Sanitaria de la UCAB en nombre de la Ing. María de Viana que me cedieron el área de laboratorio para el desarrollo de la parte experimental y a la Dirección de Servicios Generales de la UCAB en nombre de su Director el Ing. Vincenzo Bonadío que me apoyó con gran parte de los materiales.

1. Introducción

1.1 Hacia una tecnología ambientalmente sostenible

La selección de una determinada tecnología es una de las decisiones más importantes a las que se enfrenta un país sea este grande o pequeño, rico o pobre. Esta elección ejerce una influencia que se proyecta de forma generalizada en otros ámbitos de la vida y del desarrollo de los pueblos ya que determina lo que se produce, cómo y dónde es producido, en el lugar en dónde vive la gente, en quiénes hacen el trabajo en la calidad de su vida laboral, en los recursos que utilizan y en todos los otros sistemas que le sirven de apoyo al proceso productivo como es el caso del sector financiero, el de la educación, y el transporte. El impacto en conjunto de todos estos factores determina si el sistema en términos económicos es sostenible o no en un momento determinado.

Hasta ahora los medios convencionales que se venían utilizando para medir el crecimiento económico ignoraban en una gran medida su impacto ambiental, y todavía se mantiene un gran abismo entre las interpretaciones económicas y las ambientalistas en relación a lo que está sucediendo en el mundo actual.

Según la interpretación económica que promueve la comunidad empresarial esta considera que el mundo va bien cuanto mayor sea el crecimiento económico, medido este por el producto interno bruto (PIB) de los países. Bruinsma, J. (2009).

En contraposición viendo la situación por el lado ambientalista, casi la totalidad de los principales indicadores muestran que está ocurriendo un deterioro progresivo y extensivo a nivel planetario y que este se hace más acentuado en unas regiones que en otras. Es evidente que: los bosques se reducen, el desierto se extiende, las buenas tierras para cultivos van desapareciendo, las especies animales y vegetales disminuyen a niveles alarmantes y la contaminación del agua y la polución del aire se aceleran a niveles alarmantes. Brown et al (2008)

Con el paso del tiempo se ha podido comprobar que las tecnologías a gran escala y de alto costo que aplican los países ricos no son extrapolables a los países menos desarrollados.

El papel crítico que juega la tecnología en el desarrollo económico fue evidenciado por primera vez por E.F Schumacher a comienzo de los años sesenta en su libro que ya es un clásico *“lo pequeño es hermoso”*. Schumacher, E F (2001)

El argumentaba que los países del tercer mundo corrían un gran riesgo al confiar casi ciegamente en las tecnologías de los países desarrollados debido a que estas requieren de mucho capital, del uso intensivo y extensivo de la energía y de los recursos naturales. La influencia por parte de las industrias de los países ricos haría más por exacerbar que por resolver los problemas de los países más pobres. Este tipo de tecnologías llamadas a veces “duras” eran inapropiadas por varias razones que detallaremos a continuación:

- Ofrecen pocos puestos de trabajo, mientras que los países pobres, con sus masas de subempleados y desempleados, requieren de grandes cantidades de puestos de trabajo de bajo costo.
- Se concentran cerca de las grandes ciudades debido a que estas ofrecen mercados masivos y las facilidades de infraestructura, algo que no se encuentra disponible en las áreas rurales, donde vive la mayor parte de la gente pobre del planeta. En muchos casos, produce la desaparición de actividades no agrícolas tradicionales que se llevaban a cabo en las áreas rurales lo que aceleran la migración de la gente de esas áreas a los centros metropolitanos.
- Este tipo de tecnologías “duras” hacen que los países en desarrollo dependan cada vez más de los países ricos que se las proporcionan, esa dependencia se traduce en términos de préstamos de recursos financieros , repuestos , materia prima , y la contratación de asesores técnicamente calificados , además de tener que disponer de mercados donde poder vender sus productos.

La suma de estos elementos genera una distorsión en la cultura y en la economía de los países más pobres concentrando la actividad económica en las élites sociales que son las que generalmente habitan en las ciudades.

En 1965, Schumacher y sus colaboradores, fundan en Londres el Grupo de Desarrollo de Tecnología Intermedia (ITDG). Este movimiento tuvo como punto de partida la concepción

de otro tipo de modelo para el desarrollo tecnológico de los países de bajos recursos. ITDG (2019)

El modelo consideraba que el alto nivel de desempleo de las masas y la miseria rural que lo acompañaba podían ser superados solo si se creaban nuevos puestos de trabajo en las mismas áreas rurales y que estos puestos de trabajo debían ser de bajo costo, lo que permitía disponer de grandes cantidades de mano de obra de baja a mediana calificación y poder lograr esto sin tener que recurrir a niveles patológicos de endeudamiento con los mercados de capitales o requerir de importaciones masivas. Una posible salida a esta trampa del mercado es que los métodos de producción emplearan materiales locales y que los servicios asociados con ellos se mantuviesen a niveles de tecnologías muy simples; y que la producción se llevase a cabo en el mismo sitio o muy cerca del centro de producción

Los fundadores de este movimiento utilizaron por vez primera el término “tecnología intermedia” que luego derivó en el de tecnologías suaves , para indicar que en términos de costos por puesto de trabajo una tecnología que fuera apropiada para un país pobre debía ubicarse en algún lugar intermedio entre el costo casi nulo de una herramienta de mano primitiva y las máquinas que son más costosas y sofisticadas como por ejemplo una cosechadora a nivel de la producción agrícola lo que representa un importe de centenares de miles de dólares. Con una tecnología de pocos cientos de dólares se podían multiplicar por un factor de cien los nuevos empleos IAC (2004)

Se pensaba que los mejores talentos provenientes del sector de la ingeniería, debían estar comprometidos con la tarea de desarrollar tecnologías de bajo costo y crear herramientas y equipos que pudiesen estar bajo el control y pasar a ser propiedad de los sectores más pobres que viven en ambientes tanto rurales como urbanos, un tipo de tecnología con los que ellos pudieran trabajar en forma directa a pesar de su condición de pobreza.

Con el tiempo muchas de las grandes industrias que se establecieron en los países en vías de desarrollo demostraron ser muy ineficientes y solo se mantenían por la protección y las subvenciones de los gobiernos de turno. En otros casos no menos frecuentes las industrias foráneas se transformaron en depredadores de los recursos naturales de las naciones menos

desarrolladas tecnológicamente pero que poseían considerables riquezas en su territorio
Taleb N. (2008)

Como consecuencia de este tipo de enfoque las inversiones realizadas no generaron las ganancias esperadas ni tampoco lograron elevar las condiciones de vida de la mayoría los ciudadanos pobres que vivían en los ambientes rurales y urbanos de estos países.

A mediados de los años setenta, las pruebas acumuladas que demostraban del fracaso de la estrategia de crecimiento económico intensivo basada en una industria a gran escala, fue contrastada con la creciente evidencia de que la industria y la agricultura a pequeña escala y a nivel local, podían reducir los costos de transporte, decelerar el crecimiento de las ciudades, producir bienes y servicios de manera más eficiente y que a su vez eran el mejor modo de poder distribuir las rentas entre la población. Vega E., J (2004)

Claramente una tecnología apropiada sería aquella que fuese buena para las personas, el medio ambiente, y los recursos naturales del mundo. Una tecnología apropiada será aquella que soporte el desarrollo sostenible.

Otro de los objetivos de estos pioneros era crear una red internacional de organizaciones animadas por los mismos propósitos, concentrando el énfasis de la ayuda a la naciones en el uso de tecnologías de pequeña escala.

Hoy en día se cuenta con todo un movimiento de Tecnologías Apropriadas que involucra a muchas organizaciones trabajando en este campo. La empresa pionera ITDG hoy tiene oficinas en Bangla Desh, Kenya, Nepal, Perú, Sri Lanka, Sudán y Zimbabwe. ITDG (2019)

Otras organizaciones están haciendo un trabajo similar tanto en países pobres como en países ricos. Enterprise Works en los Estados Unidos de América proporciona servicios de tecnología y desarrollo empresarial a pequeñas empresas en 60 países en vías de desarrollo. Enterprise Works Incubator (2019)

Development Alternatives en India, Technoserve en EE.UU., GRET en Francia, GTZ en Alemania, SCAT en Suiza, IDRC en Canadá , la Universidad Carlos III en España y sin

olvidar una de las instituciones más antiguas y reconocidas en el campo el Instituto Schumacher en Alemania.. Schumacher-College (2019)

1.2 Las tecnologías apropiadas: un aporte al desarrollo de las naciones de menores recursos.

El concepto de tecnología apropiada, se refiere a aquella tecnología de pequeña escala, descentralizada, basada en recursos locales, de operatividad y mantenimiento sencillo, que utiliza fuentes naturales de energía, que no contamina o no provoca impactos negativos en el ambiente, y que toma en cuenta el contexto del usuario y sus conocimientos, así como elementos sociales y económicos además de los estrictamente técnicos. Se trata de herramientas o instrumentos, que facilitan o mejoran el trabajo destinado a las actividades productivas y que al mismo tiempo proporcionan un valor agregado a un producto. Antonorsi M. A. (1980)

Se cuenta con numerosos ejemplos de la aplicación de las Tecnologías Apropiadas en diversos campos. No es el propósito hacer una lista exhaustiva de las distintas variantes de este tipo de tecnologías pero a modo de ilustración incluiremos algunos ejemplos en diferentes áreas. OECD. /(2003)

En el campo de la reutilización de recursos naturales y no naturales y de su aprovechamiento industrial se incluye la reutilización de residuos sólidos no biodegradables y el uso de residuos biodegradables para elaborar compost y la aplicación de biodigestores para el tratamiento del estiércol con fines de generar biogás y otros productos. FAO. (2011).

En el campo de la construcción se han logrado excelentes resultados en diversos países con el uso de materiales como la tierra compactada mezclada con paja , la impermeabilización mediante el uso de cal y con las construcciones de viviendas con bambú. PNUD (2016)

En el área de la alimentación resaltan los desarrollos en el campo de la biotecnología agrícola para la propagación de especies vegetales mediante técnicas *in vitro* , la agricultura

orgánica urbana y el uso de biocarbón para la enmienda de los suelos de labranza. FAO. (2010).

En términos de la autosuficiencia energética además de las tecnologías alternativas que son más conocidas que es el caso de los paneles solares y de otros tipos de fuentes como la eólica y la producción de biocombustibles se han desarrollado con éxito plantas microgeneradoras hidroeléctricas. IAC (2004)

En el área de la recuperación y uso más eficiente del agua resaltan entre otros los sistemas de captación y de almacenamiento de aguas pluviales , el sistema de riego por goteo y la purificación de aguas residuales mediante el uso de biofiltros y la aplicación de microalgas para la depuración de aguas servidas con fines de riego. IAC (2004)

La difusión de tecnologías apropiadas pretende poner al alcance de la población rural una alternativa, cuyo propósito es que el usuario realice las actividades cotidianas, de producción y reproducción, con mayor comodidad, eficiencia y seguridad, y al mismo tiempo realice un mejor uso de los recursos.

Durante muchos años los organismos internacionales de asistencia técnica al tercer mundo en conjunto con instituciones de investigación se han preocupado por el tema de la transferencia de tecnologías de punta en estos países, sin embargo con mucha frecuencia se ha visto que durante el curso del proceso de transferencia se han subvalorado o ignorado las tecnologías locales y los conocimientos de los propios usuarios.

Este error viene de suponer que los cambios tecnológicos sólo se circunscriben a los aspectos técnicos, y no suelen tomar en cuenta que éstos conocimientos interactúan y repercuten en todo el sistema de relaciones sociales, culturales y productivas de las comunidades Como resultado del enfoque que conlleva a una visión parcial del problema resulta el diseño de paquetes tecnológicos que son inadaptados o inapropiados al modo de vida de los futuros usuarios.

Para propiciar la participación consciente, reflexiva y activa de los destinatarios y favorecer que ocurra un proceso de generación y apropiación tecnológica exitoso es necesario el

trabajo directo con las comunidades, propiciando que ellos se involucren en todas las etapas del diseño y en la implementación de los productos tecnológicos incluyendo los conocimientos tradicionales, sin subestimar el valor que puede aportar su propia tecnología endógena.

Este tipo de cambio tecnológico se logra a través de la aplicación de tres elementos básicos:

- La generación del proceso de investigación para poder obtener conocimientos nuevos, lo que va a originar bienes y servicios que luego se incorporan a la tecnología en una etapa posterior.
- La transferencia tecnológica que comprende el conjunto de actividades, acciones y servicios ya organizados que es necesario aportar a los futuros usuarios de forma de lograr que la tecnología sea incorporada luego a sus procesos productivos.
- La adopción que corresponde al proceso mediante el que los usuarios valoran y hacen uso de la tecnología transferida, esta involucra una fase final de evaluación con la subsecuente retroalimentación del sistema para lograr una mejora continua.

.Es imprescindible antes de iniciar cualquier desarrollo tecnológico o la simple propuesta de una posible solución a los problemas de las comunidades que son más vulnerables formular los siguientes interrogantes: ¿Qué clase de recursos naturales se utilizan y si estos son renovables? ¿Qué efecto tiene esta tecnología sobre el medio ambiente?¿Qué tipo y magnitud de implicaciones sociopolíticas están involucradas con su implementación?.

Para evaluar el nivel de adopción de una tecnología apropiada que ha sido introducida en una comunidad se considera pertinente tomar en cuenta cada uno de estos cuatro aspectos:

- La opinión de los usuarios durante todo el proceso de incorporación desde su lanzamiento hasta su incorporación definitiva.
- El uso que se le da a esa tecnología determinando las posibles desviaciones en base a la concepción inicial.

- Las adaptaciones que pudieran surgir a partir de la misma comunidad aportando otras posibles alternativas que podrían surgir enriqueciendo así el espectro de posibilidades de uso.
- La difusión espontánea de la idea, del producto o del proyecto dentro del seno de la misma comunidad y su posible exportación hacia otras comunidades que tengan perfiles similares y que necesiten resolver problemas que les son afines.

En base a la experiencia acumulada hasta el presente con las Tecnologías Apropriadas se han recopilado una serie de aspectos que con frecuencia limitan el éxito en la apropiación de tecnologías en el medio rural. El no haber tomado en cuenta las necesidades y prioridades de los usuarios. La falta de seguimiento en los proyectos. Partir de diseños inapropiados. No haber capacitado de forma eficiente a los agentes promotores de la tecnología. Limitaciones en el nivel de información que se suministra a los usuarios pero también en la claridad de la exposición. El factor humano que es muy frecuente de la resistencia al cambio. Asumir que la tecnología va a funcionar igual en el campo que como lo hizo en el laboratorio. Y la más frecuente de todas que agrupa a su vez varios de los aspectos anteriores como es el no involucrar al usuario desde un inicio en la generación y en la promoción del proyecto.

Para hacer frente a los problemas mencionados anteriormente y propiciar la adopción de este tipo de tecnologías es necesario considerar los siguientes aspectos: Identificar correctamente las necesidades y prioridades de los usuarios. Conocer las formas locales de hacer frente al problema. Valorar el interés, la participación y las aportaciones de los usuarios.

Si el modelo de economía global que prevalece hoy en día está basado en la idea de la competencia por los mercados y si consideramos a la tecnología como uno de los ejes fundamentales de dicha competencia, se hace imperativo en el presente investigar otras formas de lograr que esa competencia no se traduzca en tecnologías destructivas y se conviertan en tecnologías limpias, sanas y apropiadas.

Para lograrlo se debe promover un cambio cultural en las prácticas de la innovación y la tecnología. Esta incorporación no puede hacerse solo a partir del proceso de diseño tecnológico se deben incorporar también a las políticas estatales y propiciar los incentivos provenientes del sector productivo a escala nacional.

Las tecnologías introducen al ambiente natural elementos que el proceso evolutivo ha descartado; estos materiales y sustancias artificiales no son retornables ni degradables por la naturaleza, por lo que el deterioro ambiental pone en peligro a la biosfera y la vida humana. Ante los riesgos que prefiguran, la cuestión es preguntarse: ¿cómo restablecer el equilibrio entre la tecnología y la naturaleza?.

No podemos asumir a priori y por más tiempo que la tecnología convencional es la más apropiada para los propósitos de protección del medio ambiente. Se debe explorar otras alternativas para el manejo responsable de los recursos limitados con que cuenta el planeta y al mismo tiempo poder cubrir las necesidades de los seres humanos y que toda nuestra especie pueda contar con un trabajo digno que le sea provechoso y al mismo tiempo satisfactorio.

1. Estructura del trabajo

El presente trabajo se ha estructurado en base a ocho artículos de mi autoría publicados entre los años 2017 y 2019, incluidos en números de Tekhné que es una revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica Andrés Bello. Esta revista está indexada en : Revencyt, Latindex, Directory of Research Journals Indexing (DRJI) y en Open Academic Journal Index (OAJI) y los artículos que se publican en ella se someten previamente al arbitraje por tres profesionales conocedores del área.

Los temas que se presentan están vinculados a la Línea Matriz de Investigación de los Estudios Ambientales de la Facultad de Ingeniería de la UCAB identificándose con las áreas de desarrollo: Gestión y Manejo Sustentable de Aguas y Tecnología del Desarrollo Sustentable, líneas en que trabajo en el presente como profesor-investigador adscrito al Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería de la UCAB.

De los ocho trabajos de investigación que incluí en este documento tres de los trabajos desarrollan temas de diseño en ingeniería aplicada al área de las Tecnologías Apropriadas, en cuatro se tratan temas del área de la biotecnología vegetal aplicados al Desarrollo Sustentable (biocombustibles, tratamiento de aguas residuales y dos sobre propagación *in vitro* de plantas). El octavo artículo: capitalismo climático cierra la serie con una evaluación del estado actual del planeta en cuanto al uso racional de los recursos y a la contribución de la tecnología para minimizar la crisis ambiental que enfrentamos hoy.

La mayoría de estos trabajos desarrollan investigaciones de corte documental pero también se incluye un trabajo basado en un desarrollo experimental. El lector comprobará que varios de los artículos que se presentan en este documento no siguen el mismo orden cronológico en que se publicaron.

Esto se debe a que en algunos casos hubo que esperar a que se finalizara el desarrollo experimental y otros fueron redactados como respaldo a ponencias que fueron presentadas por el autor en las Jornadas Ambientales de la UCAB y en las Jornadas de Innovación para el Desarrollo Sostenible (JIDS), dos eventos anuales que se enfocan en aspectos específicos sobre el tema ambiental, estos eventos se realizaron en la Universidad durante el período en que se publicación los artículos.

A continuación y a modo de guía seleccioné algunos de los fragmentos que me parecieron significativos de cada uno de los artículos con el propósito de orientar al lector en el tema de las Tecnologías Apropriadas que es eje transversal de mi trabajo.

Se inicia la lista de publicaciones con : Las Tecnologías Apropriadas. ¿Un cambio de paradigma o una utopía? Muñiz, R. (2018) (a). Este artículo proporciona una visión general sobre el tema de las Tecnologías Apropriadas (TA) ubicándolas dentro del contexto de la innovación en el diseño

.Hay dos tendencias que están marcando el mundo empresarial actualmente: el papel que cumple la innovación como arma de supervivencia y el protagonismo que toma cada vez más el cuidado del medio ambiente. Ambos temas están pasando de ser un valor agregado de las empresas líderes, para convertirse en requisito mínimo de su supervivencia.

Por tal motivo las empresas grandes y pequeñas, requieren cada vez más de metodologías de trabajo e instrumentos que los orienten esos procesos de diseño en ingeniería y les ahorren tiempo en la toma de decisiones.

En relación con las tareas que nos demandaría un programa de generación de Tecnologías Apropriadas podríamos considerar los siguientes aspectos. El primer paso importante que hay que dar está en nosotros mismos; necesitamos ante todo la voluntad y el compromiso para el cambio hacia otra forma de hacer ciencia y en segundo término, conocer las necesidades de la mayoría de la población.

Para el desarrollo de las Tecnologías Apropriadas es fundamental que los investigadores se comprometan en un trabajo conjunto con la gente. Desde la detección del problema hasta la puesta en práctica de las opciones. El siguiente aspecto que se debe cumplir, en el mediano plazo, será la formación de profesionales capacitados para enfrentar los nuevos requerimientos científicos y tecnológicos.

La necesidad de lograr la precisión conceptual que nos conduce a poder resolver problemas que son decisivos para la sociedad en conjunto con la integración de la visión algunas veces utópica de las Tecnologías Apropriadas con el nuevo paradigma vigente de la innovación que se plantean en este trabajo crean un marco prometedor y viable que nos permita acercarnos cada vez más a un mundo más humano y convivencial pero su funcionalidad plena sólo será posible en condiciones económicas, políticas y sociales radicalmente distintas a las que caracterizan al modelo existente.

El segundo artículo que fue titulado: El aporte de la permacultura en el desarrollo de la agricultura urbana. Muñiz, R (2019) (a) introduce al lector en el campo de esta mezcla de arte y ciencia que se ha popularizado en todo el mundo desde hace más de cinco décadas.

La permacultura contempla el diseño y la puesta en práctica de una serie de principios generales que son aplicables en el campo de la agricultura urbana para la producción de alimentos orgánicos.

Es un sistema que no solo involucra al sector agrícola sino que se extiende también en el ámbito social, político y económico en diversos tipos de comunidades y con especial énfasis en las que habitan en las ciudades.

Este sistema se basa en los patrones y las características que presentan los ecosistemas en su medio natural y una buena parte de sus prácticas de forma consciente o fortuita han servido de insumo para la producción de los sectores agrícolas a pequeña escala en los ambientes urbanos.

Se menciona con frecuencia en los artículos y textos que tratan sobre este tema que los principios de diseño que son la base conceptual de la permacultura, se derivan de la ciencia de la teoría de sistemas y de los fundamentos que plantea la llamada ecología profunda sin dejar de tomar también en consideración diversas técnicas que provienen de las prácticas agrícolas del período pre-industrial.

La tercera publicación : El biodiesel de microalgas ¿Una alternativa adecuada para el sector energético? Muñiz, R (2017) (a) plantea el uso de las microalgas como una fuente alternativa de biocombustibles lo que representa una serie de ventajas en comparación con los combustibles que provienen de otros cultivos.

Estos microorganismos pueden crecer en agua dulce como salada fijan CO₂ de manera muy eficiente y liberan importantes cantidades de O₂ a la atmósfera y las instalaciones donde crecen no compiten con zonas de cultivo tradicionales. Los cultivos de microalgas con fines industriales se pueden simplificar a niveles muy básicos y requieren de poca automatización lo que permite dar trabajo al personal no calificado proveniente de las comunidades aledañas.

Su aceite produce una combustión más limpia que la de los combustibles fósiles y en el caso de que ocurra un derrame se genera una menor contaminación en el ambiente al degradarse en un tiempo más corto.

En este trabajo se presentó una revisión de la literatura que incluye una serie de aspectos relacionados con la tecnología de microalgas y con el procesamiento de sus extractos a

nivel industrial estableciendo el alcance y las limitaciones de dicha tecnología como una alternativa al uso de los combustibles fósiles.

El cuarto artículo muestra otro aspecto sobre la aplicación de las microalgas. Los fotobiorreactores de microalgas: Un recurso para el tratamiento terciario de aguas residuales Muñiz, R. (2019) (b) aquí se presenta como el uso de un fotobiorreactor se puede convertir en una tecnología apropiada y viable tecnológicamente para la purificación de aguas residuales.

Los avances tecnológicos en el diseño de estos sistemas han permitido mejorar notablemente la productividad y por ende la economía de los cultivos para distintos fines.

Este artículo plantea como uno de sus objetivos presentar de manera crítica la información sobre los distintos diseños de fotobiorreactores, así como de los factores que afectan el cultivo de las microalgas en este tipo de dispositivos. A partir de la información recopilada en este trabajo se sugiere el uso de estos dispositivos y en particular los que se construyen a pequeña escala como un recurso para reducir la contaminación de las aguas residuales provenientes de fuentes industriales y de origen urbano.

La propagación *in vitro* de plantas con sistemas de inmersión temporal. Una Tecnología Apropiada para la agricultura sustentable Muñiz, R. (2018) (b) es el quinto artículo que integra esta recopilación e involucra el desarrollo de una agricultura sustentable como una forma de minimizar la crisis de alimentos que enfrenta la humanidad.

En los últimos años la agricultura ha experimentado un profundo proceso de transformación que se ha reflejado en un nivel intenso de industrialización acompañada con la subsecuente incorporación de adelantos tecnológicos en los procesos productivos.

Sin embargo, este proceso ha reflejado un carácter muy dispar al haber conducido también a una agricultura muy heterogénea. En particular para el caso de nuestros países en vías de desarrollo se plantea la necesidad de producir más alimentos con una alta calidad sin la disrupción del equilibrio de los ecosistemas, fortaleciendo el desarrollo territorial y local,

generando nuevos puestos de trabajo, reduciendo así la migración masiva de la población rural a las zonas urbanas.

Una tecnología apropiada y apropiable es aquella que la pueden aplicar con éxito los pequeños agricultores, promoviendo un mayor rendimiento de la tierra productiva e incrementando la productividad de los cultivos. Para poder lograr este propósito se requiere entre otras cosas implementar biotecnologías modernas que sean simples, eficientes, de bajo costo y replicables que permitan mejorar la calidad de los procesos productivos de los pequeños productores. La propagación *in vitro* de plantas por los métodos tradicionales satisface varios de estos requerimientos pero se necesita un personal especializado, laboratorios acondicionados a tales fines e insumos que son costosos.

La tecnología de biorreactores denominada Sistemas de Inmersión Temporal (SIT) es una opción viable que ofrece considerables ventajas para la propagación *in vitro* de plantas bajo el enfoque de las Tecnologías Apropiadas.

En este trabajo se analizan algunos aspectos relevantes sobre el diseño y la aplicación de los SIT en la biotecnología agrícola, este material sirvió de insumo documental para el diseño y construcción de un SIT de bajo costo en los laboratorios de la Universidad Católica Andrés Bello tema que se desarrolla en el sexto artículo de la serie.

Diseño y construcción de un sistema de inmersión temporal de bajo costo para la propagación *in vitro* de plantas bajo el enfoque de una Tecnología Apropiable Muñoz, R. (2019) (c) es el sexto artículo que se incluye en este trabajo.

En esta publicación se describe el diseño y las distintas etapas para construir un prototipo de prueba de un Sistema de Inmersión Temporal para la propagación *in vitro* de plantas utilizando materiales de desecho. Los parámetros con los que cumple el equipo corresponden con las especificaciones de diseño que se recomiendan en la literatura y además el diseño es fácil de modificar utilizando básicamente los mismo componentes lo que le confiere al equipo flexibilidad en base a los requerimientos que presenta de cada tipo de cultivo sin tener que llegar a rediseñar todo el dispositivo.

El hecho de poder colocar en una misma bandeja múltiples envases le confiere ventajas a este tipo de dispositivo frente a otros que requieren del uso de parejas de recipientes colocados en cámaras de crecimiento bajo un régimen de iluminación con luz fluorescente y con sistemas de propulsión de aire comprimido controlados por electroválvulas y programados por computadora que son mucho más complejos que el circuito de control que se desarrolló en el trabajo y a todas luces fuera del alcance del usuario final.

Los métodos de diseño actuales requieren de nuevos enfoques para generar innovación. Los enfoques metodológicos que se presentan en el séptimo artículo de la serie titulado Biomimética. Herramientas de diseño inspiradas en la naturaleza Muñiz, R. (2017) (b) facilitan la conceptualización de las estrategias de diseño de productos, basándose en las especificaciones funcionales que aportan los seres vivos

La biomimética es una nueva ciencia basada en el estudio de modelos, sistemas y procesos de la naturaleza con el propósito de imitarlos y así plantear posibles soluciones a problemas de orden práctico para cubrir algunas de las necesidades humanas. Es un método por medio del cual los diseñadores e ingenieros se basan en el conocimiento de cómo los organismos resuelven ciertos problemas complejos en su relación con el entorno a lo largo de un proceso evolutivo de miles de millones de años.

Con este propósito científicos de diversas áreas del conocimiento han iniciado el desarrollo de múltiples proyectos orientados a emular los procesos naturales introduciendo una serie de conceptos nuevos que hoy en día son empleados por organizaciones a nivel mundial en la construcción de bienes y servicios.

El mejor camino para reconstruir la economía de nuestras naciones, sus ciudades y los mercados de trabajo es abrazar la eficiencia, la innovación y la sustentabilidad en conjunción con el desarrollo y la implementación de las nuevas tecnologías con el fin de alcanzar una reducción mantenida de las emisiones de carbono en el planeta.

Según la postura que se plantea en el octavo artículo de la serie: Capitalismo climático ¿Una crisis productiva? Muñiz , R (2018) (c) la decisión más inteligente que podemos tomar y a su vez la más lucrativa no solo es factible de aplicar sino que también ayudará a salvar el planeta de la catástrofe que se avecina, si no se hace nada o lo que hagamos es insuficiente.

Los empresarios, los ambientalistas y los ciudadanos comunes deben interesarse en buscar ideas lucrativas y hoy existen múltiples ejemplos tangibles de empresas y personas en el mundo entero que se están adaptado al cambio climático y que creen que una economía de bajo carbono conduce a mayores ganancias económicas en el corto, mediano y largo plazo, propiciando un crecimiento económico que nos permita vivir en el planeta más ameno y sustentable que sea posible.

2. Conclusiones.

A muchos de los que nos tocó vivir nuestra adolescencia y los comienzos de la juventud a finales de los años 60s y en el curso de los 70s nos marcó de una forma u otra la llamada generación hippie. Si bien gran parte de ese movimiento derivó en el desenfreno de las drogas y en el canto de sirenas de la irresponsabilidad tanto en el ámbito personal como en el familiar también trajo consigo un “ perfume” la idea de libertad y de justicia social que refrescaba las anquilosadas sociedades de varios países de Europa y en cierta medida también de Norte América.

El volver a lo simple, el alejarse del consumismo , el desarrollar el sentido de apoyo comunitario, el volver a las raíces de los pueblos, el promover el respeto por la naturaleza que dio lugar al nacimiento de los primeros movimientos ambientalistas, el abrir las fronteras a distintas visiones del mundo y a otras formas de ser que eran consideradas exóticas por que se distanciaban geográfica y culturalmente con el mundo capitalista occidental cuyo paradigma prevalecía en ese entonces y todavía perdura.

En buena medida todo este conjunto de elementos originó una revolución distinta en el pensamiento de la época que actuó sin llegar a tener los efectos catastróficos de otras

revoluciones de corte militarista y dictatorial sea con sesgos de izquierda o de derecha que a su vez se veían reforzadas por el estigma del populismo.

Sin embargo, hoy los de esa generación nos encontramos viviendo en un mundo muy diferente del que soñamos otrora. Si bien hay que reconocer los progresos que trajo la medicina y el indudable aporte a la humanidad de la tecnología informática y de la internet, en términos del desarrollo social, político y económico de la mayor parte de las naciones del mundo la ansiada alianza para el progreso que promovieron las Naciones Unidas dejó mucho que desear y la brecha entre los ricos y los pobres cada día se hace más amplia.

La experiencia acumulada hasta ahora en la segunda mitad del siglo pasado y en lo que va del presente siglo parece demostrar que al menos en la América Latina todavía no se vislumbra un rumbo que pueda conducir a lograr un nivel de desarrollo mínimo decente para la mayoría de la población y menos lograr la utopía de un desarrollo sostenible que se pueda perpetuar en el tiempo.

Da la impresión que nuestros pueblos ahogados por sus necesidades siempre le dan prioridad al elemento de la seguridad antes que a la libertad sin importar quién sea el proveedor de esa aparente seguridad o peor todavía que solo sean promesas fatuas con fines demagógicos y casi siempre electorales.

Sin abandonarnos al pesimismo y haciendo el esfuerzo por abrazar un realismo que no llegue a ser “mágico“ pareciera que la conclusión a que podemos llegar es que no hay otro remedio que las soluciones vengan desde adentro de los mismos pueblos mediante el empoderamiento de sus propias comunidades autóctonas.

La ayuda humanitaria y la asesoría tecnológica que ofrecen los países desarrollados y los organismos internacionales aunque no se deben despreciar en muchos casos carecen de efectividad y termina por ser improductiva, contraproducente y hasta inútil en muchos casos.

El camino que nos queda es largo, tortuosos y resbaladizo pero pareciera que no hay otro rumbo que educar a nuestros campesinos para que puedan lograr con sus propios medios no solo su subsistencia básica sino una vida digna que les proporcione excedentes productivos y que les permita apoyar a otros y crecer en términos de comunidad.

Algunos pensadores asociados a ese movimiento de los 60s y 70s enfocaron a la tecnología como la raíz del mal yo considero que esta es una distorsión del pensamiento o una forma miope de interpretar el futuro. Todo progreso de la humanidad ha sido acompañado de cambios tecnológicos, la edad de piedra no terminó por que se acabaran las piedras sino porque apareció una tecnología más avanzada.

El problema radica en que los centros de poder a nivel mundial conocen muy el impacto que genera el elemento tecnológico y lo usan de una forma muy eficaz como un ariete para lograr el enriquecimiento corporativo que a fin de cuentas también es el personal.

Concluimos con una leyenda del pueblo Anazasi que fué un grupo étnico que pobló la meseta central de Norte América.

Cuando nace un niño en la tribu Anazasi algún familiar cercano guarda para él un obsequio que le será entregado cuando cumpla la mayoría de edad. Alcanzado el momento oportuno y con gran ceremonia se le hace entrega al joven o a la joven de un pequeño saco fabricado con piel que supuestamente contiene tres artículos en su interior.

El joven debe vaciar la bolsa sacando los tres artículos de uno en uno. Dependiendo del orden sacará un fragmento tubular de carne seca que fue su cordón umbilical, eso significa que nunca debe perder su conexión con la tierra y con sus raíces, el siguiente objeto es una pluma de águila un recordatorio para que nunca deje de soñar y para que su imaginación pueda volar .

Siempre el iniciado queda con la expectativa de la naturaleza y el significado del tercer objeto que supuestamente se encuentra en la bolsa pero a pesar de que la evierte no encuentra nada y pregunta intrigado a la tribu ¿y la tercera cosa?.

Este es el momento crucial en que los viejos sabios de la tribu le indican al joven que aunque no se puede ver el tercer objeto está ahí y representa la sensación del misterio que siempre nos acompaña en la vida del ser humano y que junto con nuestras raíces y la imaginación nos conduce a buscar nuevos territorios y nuevas soluciones para nuestras limitaciones.

3. Referencias

Antonorsi M. A. (1980) *Tecnología Suave*. Editorial Monte Avila

Brown L.; Larsen J; Dorn J. y Moore F. (2008) *El momento del Plan B*. Earth Policy Institute. Disponible en: http://www.earthpolicy.org/datacenter/pdf/80by2020_spanish.pdf

Bruinsma, J.(2009). *The resource outlook to 2050: By how much do land, water and crop yields need to increase by 2050?* Documento presentado en el Foro de Expertos de Alto Nivel de la FAO sobre cómo alimentar al mundo en 2050, 24–26 Roma, FAO

Enterprise Works Incubator (2019). University of Illinois.
Disponible en : <https://researchpark.illinois.edu/enterpriseworks>

FAO.(2011). *Ahorrar para crecer*. Disponible en:
<http://www.fao.org/docrep/014/i2215s/i2215s.pdf>

FAO. (2010). *El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo: La inseguridad alimentaria en crisis prolongadas*. Roma. . Disponible en:
<http://www.fao.org/docrep/013/i1683s/i1683s.pdf>

IAC (2004) *Inventing a better future* Inter Academy Council Disponible en:
<file:///D:/Documents%20and%20Settings/pubsan/Mis%20documentos/Downloads/Full%20S&T%20report%20final.pdf>

ITDG (2019) Intermediate Technology Development Group – ITDG Latinoamérica.
Disponible en: www.itdg.org.pe

Muñiz, R. (2017) (a) *El Biodiesel de Microlagas ¿Una Alternativa Adecuada para el Sector Energético?*. Tekhné. Vol. 20, Núm 1 p 54- 62

Muñiz, R. (2017) (b) *Biomimética. Herramientas de diseño inspiradas en la naturaleza*. Tekhné. Vol. 20, Núm 2 p 23-38

Muñiz, R. (2018) (a) *Las Tecnologías Apropriadas ¿Un Cambio de Paradigma o una Utopía* Tekhné. Vol. 21, Núm 1 p 78-87

Muñiz, R. (2018) (b) *La propagación in vitro de plantas con Sistemas de Inmersión Temporal. Una Tecnología Apropriada para la agricultura sustentable* Tekhné. Vol. 21, Núm 3 p 43-50

Muñiz, R. (2018) (c) *Capitalismo climático ¿Una crisis productiva?* Tekhné. Vol. 21, Núm 2 p 69-82

Muñiz, R. (2019) (a) *El aporte de la permacultura en el desarrollo de la agricultura urbana* . Tekhné. Vol. 22, Núm 1 p 35-43

Muñiz, R. (2019) (b) *Los fotobiorreactores de microalgas: Un recurso para el tratamiento terciario de aguas residuales* Tekhné. Vol. 22, Núm 3 p 13-25

Muñiz, R. (2019) (c). *Diseño y construcción de un sistema de inmersión temporal de bajo costo para la propagación in vitro de plantas bajo el enfoque de una tecnología apropiable* Tekhné. Vol. 22, Núm 4 p 60-79

OECD. /(2003) . *Innovative People: Mobility of Skilled Personnel in National Innovation Systems*. Paris, France: Organisation for Economic Cooperation and Development.
Disponible en: www.oecd.org/publications.

PNUD (20|16) *Panorama general Informe sobre Desarrollo Humano 2016*
Desarrollo humano para todos. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
Disponible en:
<https://www.undp.org/content/dam/undp/library/corporate/HDR/HDR2016/HDR16%20Overview%20Spanish.pdf>

Schumacher, E F (2001) . *Lo pequeño es hermoso: Economía como si la gente importara* . Editorial AKAL, (texto en línea)

Schumacher-College (2019) Disponible en : Página oficial
:<https://www.masterstudies.com/universities/United-Kingdom/Schumacher-College/>

Información general: <https://medium.com/age-of-awareness/ciencia-con-conciencia-schumacher-college-educaci%C3%B3n-para-el-siglo-21-2d2ac9803>

Taleb N. (2008) *El Cisne negro. El impacto de lo altamente improbable*. Editorial Paidós. Barcelona. Reseña del libro. Disponible en: <http://pepsic.bvsalud.org/pdf/rpsua/v1n2/v1n2a7.pdf>

Vega E., J (2004) *Traslación y adaptación de técnicas. tecnologías apropiadas y procesos de transferencia* . Revista CTS, nº 3, vol. 1, Septiembre de 2004 (pág. 51-71)



Las Tecnologías Apropriadas ¿Un Cambio de Paradigma o una Utopía?

Rafael Muñiz ¹

rmuniz53@gmail.com

¹Centro De Investigación Y Desarrollo De Ingeniería (CIDI)

Historia del Artículo

Recibido 19 de Diciembre de 2017

Aceptado 14 de Febrero de 2018

Disponible online: 05 de Marzo de 2018

Resumen: El incremento del beneficio económico y del crecimiento continuo que caracterizan al modelo capitalista actual han requerido incorporar a la ciencia y la tecnología en el ámbito productivo. Este tipo de conocimiento se asimila dentro de pautas impuestas por el propio sistema y suele contribuir a la estabilidad del mismo. La lógica de la ganancia condiciona a la tecnología contemporánea, cuyo rasgo esencial es lograr una innovación permanente en el desarrollo científico con el propósito de lograr un crecimiento continuo que se refleja en el PIB de las naciones. Tal paradigma tecnológico persiste pese a sus elevados costos económicos, sociales, políticos y ambientales que se hacen evidentes en los países en vías de desarrollo y que se extiende también a los países desarrollados donde se plantea una relación muy estrecha entre el crecimiento económico y el nivel de desigualdad en la sociedad. Desde el inicio de la década de los 70s se ha propuesto un nuevo modelo de práctica científica que persiste hasta el presente, basado en una racionalidad determinada y que ofrece una perspectiva atractiva para potenciar el desarrollo autónomo y apropiado de las sociedades del tercer mundo. La propuesta de la Tecnología Apropriada aparece como una respuesta a la crisis de las sociedades actuales al proponer un cambio profundo a nivel de las tecnologías, de su proceso de creación y de su uso social y está enfocado a dar una respuesta a los problemas de las sociedades industriales actuales mediante la creación de sociedades más libres en armonía con su ambiente. En el presente trabajo se muestran diversos ejemplos de aplicación de este tipo de tecnologías y se propone una metodología donde se incluyen criterios y procedimientos de diseño para posibles productos y servicios que sirvan de semillero de proyectos para estimular el desarrollo de pequeñas empresas en comunidades de bajos recursos en armonía con su medio ambiente.

Palabras Clave: tecnología apropiada, innovación inversa, tecnología intermedia, tecnología alternativa, TRIZ

The Appropriate Technologies A Change of Paradigm or a Utopia?

Abstract: The increase in the economic benefit and the continuous growth that characterize the current capitalist model have required the incorporation of science and technology in the productive sphere. This type of knowledge is assimilated within guidelines imposed by the system itself and usually contributes to its stability. The logic of profit conditions contemporary technology, whose essential feature is to achieve a permanent innovation in scientific development with the purpose of achieving a continuous growth that is reflected in the GDP of the nations. Such technological paradigm persists despite its high economic, social, political and environmental costs that are evident in developing countries and also extends to developed countries where there is a very close relationship between economic growth and the level of inequality in society. Since the beginning of the 70s a new model of scientific practice has been proposed that persists up to the present, based on a determined rationality and that offers an attractive perspective to promote the autonomous and appropriate development of third world societies. The proposal of Appropriate Technology appears as a response to the crisis of current societies by proposing a profound change at the level of technologies, their process of creation and their social use and is focused on providing an answer to the problems of current industrial societies through the creation of freer societies in harmony with their environment. The present work shows several examples of application of this type of technologies and proposes a methodology that includes criteria and design procedures for possible products and services that serve as a seedbed of projects to stimulate the development of small businesses in low-income communities resources in harmony with their environment.

Keywords: appropriate technology, reverse innovation, intermediate technology, alternative technology, TRIZ

I. INTRODUCCIÓN

"Una sociedad convivencial es una sociedad que da al hombre una posibilidad de acción más autónoma y más creativa, con el auxilio de herramientas menos controlables por otros. La productividad se conjuga en términos de tener, la convivencialidad en términos de ser"

Ivan Illich

Una de las primeras preguntas que surgen de forma casi espontánea cuando se plantea el término de Tecnologías Apropriadas (TA) es si su denominación es debida a que son apropiadas para un determinado tipo de uso o aplicación o los son para quiénes las utilizan. Una forma de esclarecer su significado se relaciona con el cumplimiento de una serie de postulados que plantean un nuevo modelo de desarrollo, cuyo propósito es potenciar una relación armónica entre el ser humano y su medio ambiente y de propiciar la no explotación de los seres humanos entre sí.

Desde este punto de vista los ejes centrales de este nuevo modelo son: a) La satisfacción de las necesidades humanas básicas a fin de reducir las desigualdades entre los países y dentro de ellos mismos; b) La autosuficiencia endógena mediante la participación y el control social; c) La armonía con el medio ambiente y d) El trabajo creativo, que permita el desarrollo de todas las capacidades humanas.

En ese sentido hablamos que son Tecnologías Apropriadas (TA) para el ambiente, de acuerdo con la tarea que se precisa realizar y también apropiadas para la gente. Para ser apropiadas al ambiente tienen que utilizar recursos renovables y no sobrepasar la capacidad de carga de los ecosistemas en los que se insertan. Para ser apropiadas para la tarea tienen que dar respuesta al problema productivo o doméstico de que se trate de manera eficaz, eficiente y generando riqueza. Finalmente, para ser apropiadas para la gente, tienen que ser de bajo costo, de fácil manejo y manutención, de sencilla comprensión y reproducibles a escala local.

Las Tecnologías Apropriadas son adecuadas a la realidad de los países en vías de desarrollo en tanto que requieren de menor inversión de capital y de mayor dedicación de mano de obra.

Las TA dialogan y trabajan conjuntamente con los conocimientos tradicionales, los saberes populares y tienen horizontes de amortización de largo plazo lo que no implica necesariamente el uso de una baja tecnología ya que suelen beneficiarse de las investigaciones más avanzadas.

Quienes proponen el término lo usan para describir aquellas tecnologías que consideran más adecuadas para su uso en países en vías de desarrollo o en zonas rurales subdesarrolladas de los países industrializados, en las que sienten que las altas tecnologías no podrían operar y mantenerse. Características tales como el bajo coste, la baja utilización de combustibles fósiles o el uso de recursos disponibles localmente pueden representar ventajas en términos de la sostenibilidad

El término adquirió relevancia durante la Crisis del petróleo de 1973 y con el movimiento ecologista de los 70s. El economista germano-británico E. F. Schumacher fue uno de los creadores del concepto. [1]

Schumacher nació en Bonn, Alemania en 1911 hijo de un profesor de economía política. Estudió en Oxford y luego en la Universidad de Columbia. En 1966 fundó el "Intermediate Technology Development Group" (Grupo de Desarrollo de Tecnología Intermedia), conocido ahora como Practical Action (Soluciones Prácticas) con operaciones en Latinoamérica y el Caribe.

Su obra más conocida Lo pequeño es hermoso: Economía como si la gente importara consta de una colección de sus ensayos publicado por primera vez en 1973. The Times de Londres clasificó su obra entre los 100 libros más influyentes publicados desde la Segunda Guerra Mundial.

Schumacher culpa al pensamiento económico convencional de dejar de considerar la escala más apropiada para realizar una actividad productiva, combate las nociones de que "el crecimiento es bueno", y de que "más grande es mejor", y cuestiona cuan apropiado es usar la producción en masa dentro de los países en desarrollo, promoviendo en lugar de eso una "producción de las masas". Schumacher fue uno de los primeros economistas en cuestionar cuan correcto es emplear el Producto Interno Bruto para medir el bienestar humano, enfatizando que el fin debería ser "la obtención de un máximo de bienestar con un mínimo de consumo".

Según plantea Marcel Antonorsi en su libro *Tecnología Suave* publicado en 1980 [2] muchos de los planteamientos centrales sobre las Tecnologías Apropriadas se deben al trabajo de un grupo de investigadores entre los que resaltan Robin Clarke y Peter Harper. Clarke, un periodista científico inglés concibió este tipo de tecnologías desde el punto de vista de la ciencia pero en oposición al enfoque militar-industrial de su época y fue el principal impulsor del proyecto BRAD abreviatura de Biotechnic Research and Development un proyecto que incluía dos comunidades de investigación de campo en las TA una en el país de Gales y la segunda en Normandía.

En contraposición con Harper que desarrolló un sentido socialista más radical e interesado en las acciones políticas que se derivan y acompañan a las TA, Clarke se muestra como un hombre liberal y progresista relacionado con los problemas técnicos que implicaban transformar una granja en BRAD.

Harper después de haber estudiado zoología y psicología experimental se dedica a investigar la aplicación de métodos bioquímicos al aprendizaje del comportamiento pero a partir de 1970 se enfoca en la búsqueda de nuevas soluciones a los problemas que plantea en la sociedad el progreso científico y técnico. Su actividad en el sentido de promover el desarrollo de las TA fue muy intenso, en particular en la divulgación de sus ideas a través de numerosos artículos y encuentros

internacionales y formular los fundamentos teóricos que soportaban su propuesta de aplicación de las Tecnologías Apropriadas [2].

Otra de las contribuciones fundamentales a la promoción indirecta de la TA viene del Manifiesto para la Supervivencia formulada por el Club de Roma en su informe sobre los límites del crecimiento. Por su parte otros dos autores refuerzan la promoción de este tipo de enfoques: Ivan Illich plantea la búsqueda de una serie de principios guía que sirvan para superar la crisis ambiental que se avecina y el logro de lo que él denomina una sociedad convivencial a la que pueda dotarse con herramientas que el hombre pueda controlar y que promuevan la supervivencia, la equidad y la autonomía creadora [2].

Otro autor relevante es Murray Bookchin quien plantea que la tecnología actual puede llegar a resolver los problemas cuantitativos de la humanidad mas no los cualitativos, su tesis es el paso del reino de la necesidad al reino de la libertad lo que él llamó el fin de la utopía.

Para finalizar debemos mencionar la contribución al tema de las TA que desarrolló el Instituto de la Nueva Alquimia fundada por John Todd cuyo propósito era la investigación aplicada de este tipo de tecnologías. Todd afirmaba "no somos una elite científica sino una comunidad que busca establecer conocimientos directamente utilizables por las pequeñas comunidades con el propósito de permitirles que vivan por sí mismas del campo"[2].

A pesar de todo el entusiasmo de estos investigadores pioneros y de su trabajo por promover el uso de las TA como un recurso para mejorar la calidad del ambiente natural donde convivimos los seres humanos con otras especies, hoy vemos que los resultados de su aporte no se han podido consolidar y que muchos piensan que sus ideas fueron solo parte de un sueño utópico. Consideramos que en vista de los nuevos conocimientos técnico-científicos que se han acumulado en particular en este nuevo siglo es pertinente la reformulación de la cuestión que anima este artículo. La pregunta persiste, ¿nos

encontramos ante un cambio de paradigma o es otro de los mitos que acompaña el renacer de una utopía?

II. EL AMPLIO ESPECTRO DE LAS TECNOLOGÍAS APROPIADAS

Las Tecnologías Apropriadas agrupan a una serie de técnicas y procedimientos que plantean una serie de enfoques diversos, algunos son aplicaciones tradicionales de los modelos de desarrollo ambientalista que se iniciaron en la década del 70 e incluso antes como es el ejemplo de la permacultura. Otros se han consolidado en épocas recientes como

el caso de la biomimética, una rama derivada de la biónica que estudia las propiedades físicas y químicas de los organismos para aplicarlos en el entorno industrial.

En la Figura 1 se presentan algunas de las variantes más conocidas que se pueden considerar como ejemplos representativos de este tipo de enfoque tecnológico. En esta sección del trabajo incluimos algunos detalles particulares a cada una de las variantes y su marco de aplicación según el enfoque que plantean las TA.

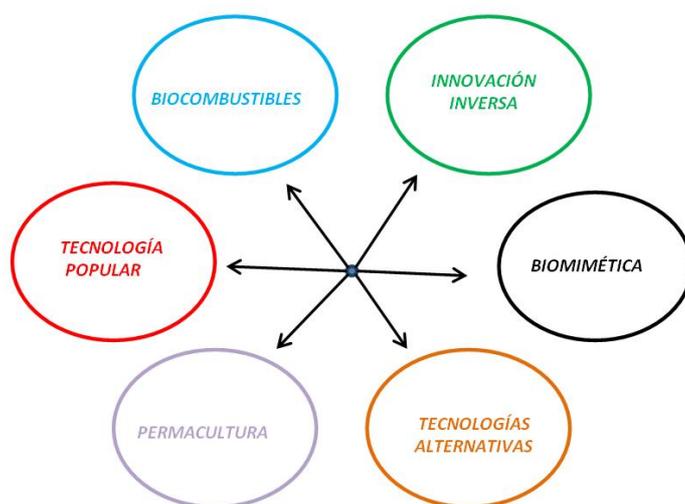


Figura 1: Ejemplos de los diversos enfoques que comprenden las Tecnologías Apropriadas (Fuente: el autor)

2.1 Biocombustibles

El término hace referencia a una serie de sustancias orgánicas que de una forma u otra derivan de la biomasa, mediante un proceso biológico, espontáneo o provocado, que las hace utilizables como fuente potencial de energía.

Es por esta razón que algunos autores se refieren a este tipo de combustibles como agrocombustibles para referirse a su origen a partir de productos agrícolas y en cuya producción no intervienen productos de síntesis química. Los combustibles de origen biológico pueden sustituir parte del consumo de combustibles fósiles tradicionales, como el petróleo o el carbón.

Para la obtención de los biocarburantes se pueden utilizar especies de uso agrícola tales como el maíz o la mandioca, ricas en carbohidratos que mediante la fermentación y destilación producen etanol, o plantas oleaginosas como la soja, girasol y palmeras que sirven como fuentes de aceites que una vez que han sido saponificados sirven como sustitutos y/o complementos de la gasolina y el diésel .

Al utilizar este tipo de carburantes se reduce considerablemente el dióxido de carbono que es enviado a la atmósfera ya que estos materiales lo van absorbiendo a medida que se van desarrollando, mientras que emiten una cantidad similar a la emitida por los combustibles convencionales. El principal

impedimento tecnológico para la utilización de la biomasa vegetal como fuente de energía es, en general, la ausencia de una tecnología de bajo costo. Los futuros biocombustibles deben ser sostenibles en términos técnicos, económicos, ambientales y sociales para poder jugar un papel importante [3].

2.2 Innovación Inversa

El término Innovación Inversa fue popularizado por Dartmouth Vijay Govindarajan y Chris Trimble [4] y se refiere al proceso mediante el cual productos desarrollados como modelos de bajo costo y que pueden satisfacer cierto tipo de necesidades en las naciones en desarrollo se trasladan a los mercados de menores recursos de los países del primer mundo.

Por lo general, las empresas comienzan sus esfuerzos de globalización mediante la eliminación de características costosas de un producto ya establecido en sus países de origen y luego tratan de vender estos productos al mercado en los países menos desarrollados con un precio más bajo. Este enfoque, desafortunadamente no es muy competitivo porque va dirigido sólo a los segmentos más ricos de la sociedad en estos países en desarrollo. La innovación inversa, por el contrario, lleva a los productos que se crean a nivel local en los países en desarrollo a prueba en los mercados locales y si tiene éxito, a continuación, mejoran el producto y se entrega en el mundo industrializado [4].

2.3 Biomimética:

La biomimética (de bios, vida, y mimesis, imitar) es una nueva ciencia basada en el estudio de modelos, sistemas y procesos de la naturaleza con el propósito de imitarlos y así plantear posibles soluciones a problemas de orden práctico para cubrir algunas de las necesidades humanas.

La biomimética, es un método por medio del cual los diseñadores e ingenieros se basan en el conocimiento de cómo los organismos resuelven ciertos problemas complejos en su relación con el entorno a lo largo de un

proceso evolutivo de miles de millones de años. Con este propósito científicos de diversas áreas del conocimiento han iniciado el desarrollo de múltiples proyectos orientados a emular los procesos naturales introduciendo una serie de conceptos nuevos que hoy en día son empleados por organizaciones a nivel mundial en la construcción de bienes y servicios.

Existen múltiples aplicaciones de la biomimética que parten desde el campo del diseño de productos industriales, pasando por la arquitectura hasta el desarrollo de tecnologías amigables con el ambiente.

La investigación en biomimética contempla el estudio de diversas características según el tipo de aplicación y las especificaciones que requiere el encargo de diseño que incluyen: estructuras, materiales, funciones y formas y con frecuencia la combinación de dos o más de estos atributos. Los métodos de diseño actuales requieren de nuevos enfoques para generar innovación. Uno de este tipo de enfoques metodológicos es la aplicación de la Teoría de la Inventiva de Resolución de Problemas conocida mediante el acrónimo de TRIZ que trataremos en el apartado siguiente de este trabajo [5].

2.4 Tecnologías Alternativas:

Bajo la denominación de tecnologías alternativas se agrupan un conjunto de opciones con bajo impacto ambiental que plantean el uso de otras fuentes de energía a los combustibles fósiles utilizando el sol el viento la energía nuclear la mareomotriz y la geotérmica entre otras a la que se suma la participación del parque automotor de propulsión eléctrica .

Este tipo de tecnologías son las más conocidas entre las variantes de las TA. Aunque en general requieren de elevadas inversiones de capital en investigación y desarrollo y en la construcción de los equipos. Una característica que las compromete como posibles integrantes de las TA y en las últimas décadas se han realizado desarrollos interesantes para lograr su miniaturización

con el propósito de aplicarlos en pequeñas comunidades rurales y urbanas. Otra vertiente de este tipo de tecnologías se enfoca hacia la purificación de aguas residuales, el reciclaje de materiales industriales por el núcleo familiar mediante la denominada economía circular [6].

2.5 Permacultura:

El término permacultura fue acuñado por primera vez por los australianos Bill Mollison y David Holmgren en 1978. Este tipo de enfoque fue una de las primeras TA's en popularizarse a partir de la década de los setenta. La palabra permacultura es una contracción, que originalmente se refería a la agricultura permanente, pero se amplió para significar también una cultura permanente, debido a que se ha comprendido que los aspectos sociales son parte integral de un sistema verdaderamente sostenible. La permacultura es un sistema de principios de diseño agrícola y social, político y económico basado en los patrones y las características de los ecosistemas naturales.

Tiene muchas ramas, entre las que se incluyen el diseño ecológico, la ingeniería ecológica, diseño ambiental, la construcción y la gestión integrada de los recursos hídricos, que desarrolla la arquitectura sostenible y los sistemas agrícolas modelados desde el enfoque de los ecosistemas naturales [7].

2.6 Tecnología Popular:

Es posible que en una buena medida el concepto de tecnología popular sea el más próximo al sentido que Schumacher y otros autores pretendían dar a las TA en los inicios de este movimiento filosófico-económico. No obstante existe una diferencia entre lo que es tecnología popular y tecnología apropiada. La primera nace de las necesidades y valores personales, de las ideas, ingenio, conocimiento humano llevando a crear y reforzar los valores sociales, productivos y culturales del individuo y comunidad.

La connotación del término popular se refleja también en la tecnología apropiada, es por esta razón que se define como: “la tecnología que tiende a armonizar y crear nexos de interdependencia entre un conjunto de tecnologías destinadas a la producción de bienes y servicios, proporcionándoles el carácter de sustentabilidad, de equidad en los usos de los recursos naturales y de la transformación social necesaria, apoyándose y desarrollando los valores históricos y culturales propios de las comunidades partiendo de la premisa de que el desarrollo endógeno debe nacer desde el interior de las comunidades.”

En este sentido podemos considerar a las tecnologías apropiadas como un conjunto de tecnologías populares acopladas, constituyéndose en un complejo sistema de desarrollo tecnológico el cual necesariamente pasa a ser parte activa en la recuperación y preservación de nuestro ambiente y de la producción social de las comunidades en especial de las de bajos recursos. De esta forma se genera un control en el crecimiento de la producción social debido a la interdependencia que establecen los medios o componentes de producción con la capacidad de sustentación que nos presentan los recursos naturales y las necesidades esenciales de la comunidad.

A partir de lo expuesto en los párrafos anteriores podemos decir que las Tecnologías Apropiadas ofrecen una opción al menos atractiva y posiblemente viable para mitigar una gama considerable de las limitaciones y las dificultades que padecen las poblaciones pobres del tercer mundo.

No se puede prescindir del componente de creatividad y de los elementos tradicionales que propulsan este tipo de metodología pero consideramos de mucha utilidad el poder disponer de un enfoque metodológico que guíe en forma sistemática su desarrollo.

En las pasadas décadas se han popularizado una serie de herramientas de diseño como es el caso de Design Thinking [8] o Integrated Product Development [9]. Sin quitar sus

bondades a estas propuestas, muy pocas ofrecen un algoritmo que permita sistematizar y propulsar el acto creativo, sin obviar por supuesto el factor de la inspiración natural del ser humano.

En la próxima sección de este artículo se propone como una opción al diseño de TA la metodología TRIZ que ha sido aplicada con éxito en diversos problemas relacionados con la tecnología y ha servido como un recurso para orientar el proceso de innovación.

III. TRIZ UNA OPCIÓN PARA EL DISEÑO DE TECNOLOGÍAS APROPIADAS

El diseño de Tecnologías Apropriadas al igual que cualquier otro aspecto relacionado con el desarrollo tecnológico sigue o debería seguir un determinado esquema de razonamiento que facilite y potencie el ingreso al mercado de productos que resuelvan problemas y deficiencias que experimentan las sociedades.

Las distintas vertientes que se describen en el apartado anterior han aportado sus enfoques particulares en el sentido de establecer un bosquejo de las herramientas y opciones metodológicas para este campo del conocimiento. Algunos de estos enfoques coinciden con la recomendación de que el desarrollo de las TA esté basado en la consulta con las comunidades a las cuales van dirigidos los productos y que los propios usuarios finales participen a lo largo del proceso de diseño aportando la sabiduría cultural acumulada durante la historia de sus comunidades.

Aunque no se discute el considerable valor que este aspecto aporta al diseño se puede vislumbrar que no es suficiente. En todo diseño también se debe tomar en cuenta el factor de la imaginación y la creatividad de aquellos que sirven como pioneros y realizadores del proceso, no obstante consideramos que uno de los factores que en mayor grado potencia el desarrollo tecnológico es la metodología que se aplica para el diseño. En la medida que esta metodología sea sistemática, coherente y fácil de reproducir mayor será la probabilidad de

obtener el éxito en los proyectos, todavía en mayor grado si ese proceso se puede transformar en un algoritmo.

TRIZ es un método sistemático que estimula la creatividad tecnológica. El término proviene del acrónimo ruso de Teoría de Resolución de Problemas Inventivos. El creador de este método fue el ingeniero ruso Genrich Altshuller [10], que desarrolló la teoría analizando más de un millón de patentes. Él se percató de que a pesar de que los inventos que analizó se orientaban a resolver problemas de diferente naturaleza y en campos muy distintos, las soluciones que planteaban dichas patentes se podían agrupar partiendo de un conjunto de principios de invención generales.

Sucede frecuentemente que si un diseñador no logra la solución a un problema determinado busca nuevas soluciones algunas más allá de su experiencia y su conocimiento. Eso conduce a un incremento en el número de pruebas de ensayo y error dependiendo de lo bien que pueda manejar sus recursos de corte psicológico como la intuición y la creatividad. Un elemento adicional que complica el proceso es que estas herramientas psicológicas tales como la experiencia y la intuición, son difíciles de transmitir a otras personas dentro de la organización

La técnica TRIZ de resolución de problemas surge de un enfoque diferente al intuitivo y se basa en utilizar al máximo los conocimientos disponibles sobre un problema concreto y llegar a su solución mediante la comparación y adecuación de soluciones que han sido aplicadas previamente a problemas similares, siguiendo esta estrategia el problema particular es proyectado como un problema estándar de naturaleza análoga o similar.

Altshuller define un problema inventivo como uno en que su solución ocasiona otros tipos de problemas, en otras palabras, que cuando algo se mejora, otros elementos del problema usualmente empeoran, a lo que él llamó la contradicción técnica,

La esencia del TRIZ sigue el principio de abstracción, este principio dice, que dado un problema concreto, para el que se requiere una solución concreta, en lugar de buscarla por prueba y error, como sucedería en un análisis técnico convencional o en la aplicación de una técnica de creatividad basada en la psicología, se puede obtener la solución mediante un procedimiento directo de abstracción y especificación. Otro principio importante de TRIZ es el que se considera a los sistemas como entidades cerradas, es decir, se busca que la resolución de un problema se pueda lograr dentro de sus mismas posibilidades involucrando un mínimo de agentes externos, lo que se denomina en la terminología TRIZ un aumento de su idealidad. La tercera estrategia que plantea esta metodología es el Análisis de la Sustancia Campo que consiste en dividir un problema mayor en partes más pequeñas [11].

A partir de los estudios realizados por Altshuller y sus colaboradores se establecieron 39 parámetros que participaban con frecuencia en muchas de las soluciones planteadas a los problemas técnicos de invención. Muchos de estos parámetros involucran propiedades físicas como: peso, longitud, tensión, forma, velocidad, potencia y otros implican efectos relacionados con el uso del producto tecnológico: adaptabilidad, facilidad de uso, confiabilidad, precisión de fabricación, exactitud de medidas, entre otros.

En adición también obtuvo con su estudio 40 principios generales de invención, esta lista se conoce en este campo como “Los 40 Principios de Inventiva”. Ejemplos de esta categoría son propiedades como: segmentación, asimetría, homogeneidad, cambio de color, retroalimentación, acción periódica, expansión, contracción, inversión, entre otros.

Como mencionamos en los párrafos anteriores, uno de los objetivos de TRIZ es resolver las contradicciones que se plantean en el proceso de diseño de productos tecnológicos. Altshuller considera dos tipos de contradicciones las de tipo técnico y las de orden físico [12].

Una contradicción técnica existe cuando, tratando de mejorar un atributo, A, de un sistema tecnológico, otro atributo B, del mismo sistema tecnológico, se deteriora. Por ejemplo, si se quiere fabricar un producto más robusto y duradero (atributo deseado), automáticamente se hace más pesado y costoso por el material requerido para ello (atributo indeseable).

El término contradicción física es común en TRIZ. Ambas contradicciones pueden aparecer en cualquier proyecto de diseño. Los requerimientos mutuamente exclusivos son demandados tanto por los aspectos técnicos del proceso tecnológico como por las contradicciones físicas que se presentan debido a la naturaleza de los materiales empleados. Para la resolución de contradicciones técnicas, se utilizan la Matriz de Contradicciones Técnicas, MCT [13].

En la Figura 2 se muestra el proceso de aplicación de la matriz de contradicciones que corresponde a un cuadro de doble entrada, donde se colocan las 39 características básicas de los sistemas técnicos y en el cruce de cada fila y columna se relacionan con los tipos de soluciones inventivas que se pueden aplicar. A cada característica se le asigna un número. Del mismo modo los números identifican los principios inventivos específicos de la lista de 40 que se pueden seleccionar en la lista original que propuso Altshuller. El orden de presentación en cada columna de casillas no es aleatorio, sino que indican cuales son en orden de jerarquía los más utilizados en las patentes investigadas.

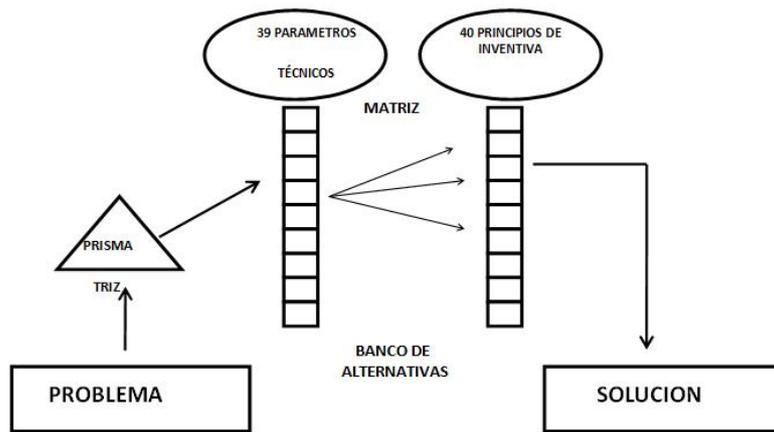


Figura 2: Esquema del proceso de aplicación de la matriz MCT de diseño de tecnologías con el método TRIZ (Fuente: adaptación del autor)

Se debe acotar que los principios no son una solución directa a la contradicción, sino una línea de razonamiento para encontrar la solución. Las casillas de la matriz que no se consideran corresponden a contradicciones técnicas que no se pueden dar o que no están resueltas.

La resolución de un problema con esta herramienta requiere la abstracción del sistema, la identificación de la contradicción técnica, la aplicación del principio y la especificación para obtener de nuevo el sistema físico, con el problema ya resuelto.

Cuando un analista tiene definida una contradicción desde el punto de vista del problema, resulta posible encontrar una variedad de creación y de solución efectiva para resolver ese problema. Usualmente un problema no es resuelto definitivamente si su contradicción no es superada.

Las herramientas como TRIZ que intentan sistematizar el proceso de diseño de productos evitan que en muchos departamentos de I+D se hagan esfuerzos desgastantes en solucionar problemas técnicos que ya han sido resuelto en algún momento y cuya solución ya fue consignada en alguna patente. No es necesario que en el afán de innovar se esté reinventando la rueda en diferentes empresas simultáneamente [14].

Una tendencia que se viene desarrollando en la presente década es la aplicación de esta metodología en el desarrollo de innovaciones ambientales, un campo todavía virgen para la aplicación de TRIZ, pero promisorio debido a la coherencia entre los principios de optimización y resolución de contradicciones sobre los cuales se basa la metodología TRIZ y los objetivos ambientales [15].

IV. CONCLUSIONES

El diseño de productos es un área que presenta varios elementos que le son particulares. Enfocándolo desde el punto de vista de las empresas constituye el núcleo de la innovación tecnológica y se forja como un factor clave en la estrategia competitiva de las organizaciones. En el campo académico, representa un área de investigación que aunque es muy atractiva requiere todavía de madurez para llegar a consolidarse como un cuerpo de conocimiento formal. Desde el punto de vista social, involucra una actividad con la capacidad de satisfacer muchas de las necesidades de las comunidades. Considerando el punto de vista ambiental, es una de las actividades sobre la cual recae un elevado tenor de responsabilidad, porque desde ahí se determinan los impactos que el futuro producto podrá generar sobre el medio ambiente.

Hay dos tendencias que están marcando el mundo empresarial actualmente: el papel que

cumple la innovación como arma de supervivencia y el protagonismo que toma cada vez más el cuidado del medio ambiente. Ambos temas están pasando de ser un valor agregado de las empresas líderes, para convertirse en requisito mínimo de supervivencia. Por tal motivo las empresas grandes y pequeñas, requieren cada vez más de metodologías de trabajo e instrumentos que los orienten esos procesos de diseño en ingeniería y les ahorren tiempo en la toma de decisiones. En ese orden de ideas la Metodología TRIZ proporciona una herramienta que aunque no es de fácil implementación aporta una alternativa valiosa para la innovación de nuevas tecnologías al servicio de las comunidades y de la preservación del ambiente.

En relación con las tareas que nos demandaría un programa de generación de Tecnología Apropriada podríamos considerar los siguientes aspectos. El primer paso importante que hay que dar está en nosotros mismos; necesitamos ante todo la voluntad y el compromiso para el cambio hacia otra forma de hacer ciencia y en segundo término, conocer las necesidades de la mayoría de la población. Para el desarrollo de Tecnologías Apropriadas es fundamental que los investigadores se comprometan en un trabajo conjunto con la gente. Desde la detección del problema hasta la puesta en práctica de las opciones.

El siguiente aspecto que se debe cumplir, en el mediano plazo, será la formación de profesionales capacitados para enfrentar los nuevos requerimientos científicos y tecnológicos.

La necesidad de lograr la precisión conceptual que nos conduce a poder resolver problemas que son decisivos para la sociedad en conjunto con la integración de la visión algunas veces utópica de las Tecnologías Apropriadas con el nuevo paradigma vigente de la innovación que se plantean en este trabajo crean un marco prometedor y viable que nos permita acercarnos cada vez más a un mundo más humano y convivencial pero su funcionalidad plena sólo será posible en

condiciones económicas, políticas y sociales radicalmente distintas a las que caracterizan al modelo existente.

REFERENCIAS

- [1] Schumacher, E F (2001) . *Lo pequeño es hermoso: Economía como si la gente importara* . Editorial AKAL, (texto en línea)
- [2] Antonorsi M.A. (1980) *Tecnología Suave*. Editorial Monte Avila.
- [3] Muñiz R. (2017) *El Biodiesel de Microalgas ¿Una alternativa adecuada para el sector energético?* Revista Tekhne. Vol 18 Facultad de Ingeniería. UCAB
- [4] Govindarajan V y Trimble C. (2012) *Innovación Inversa*. Editorial Norma
- [5] Muñiz R. (2017) *Biomimética. Herramientas de diseño inspiradas en la naturaleza* . Revista Tekhne. Vol 20 Facultad de Ingeniería. UCAB
- [6] Portillo A y Sirvent G (1987) *Tecnologías Alternativas para el Desarrollo Urbano*. Centro de Ecodesarrollo. Altadena México D.F.
- [7] Holmgren D (2013) *Permacultura, principios y senderos más allá de la sustentabilidad*. Editorial Kaicron
- [8] Brown, T., & Wyatt, J. (2010). *Design Thinking for Social Innovation*. Stanford Social Innovation Review,
- [9] Andreasen MM, Hein L (1987) *Integrated product development*. IFS-Springer Verlag, Berlin
- [10] Cordova W (2008) *Triz ,la herramienta del pensamiento y la innovación sistemática*. Revista del Departamento de Ciencias Administrativas Vol 3 N°6. Fondo Editorial. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [11] Manguera B (2015) *Metodologias de Inovação: Soluções da TRIZ aplicadas em um ambiente Design Thinking*. Universidad Estadual Paulista” Julio de Mesquita Filho” Campus de Guaratingueta
- [12] Trinidad Dorantes L (2007) *TRIZ: Una herramienta poderosa para las empresas mexicanas en los ámbitos productivo y administrativo*. Universidad Nacional Autónoma de México
- [13] Nishiyama J. C. ; Zagorodnova T y Requena C. E (2013) *TRIZ , Teoría de Resolución de Problemas Inventivos* .Universidad Tecnológica Nacional Regional General Pacheco. Argentina
- [14] Reyes P (2004) *Método TRIZ*. Escuela Superior de Comercio y Administración. Maestría en Administración de Negocios. Instituto Politécnico Nacional. México
- [15] Chala J. C. (2012) *Diseño de una metodología que reduzca la necesidad de expertos en el diseño de productos ambientalmente eficientes mediante el uso de elementos de la teoría para la resolución de problemas de inventiva ,TRIZ*. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial Bogotá, D.C., Colombia



El aporte de la permacultura en el desarrollo de la agricultura urbana

Rafael Muñiz¹

rmuniz53@gmail.com

¹ Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería (CIDI) Universidad Católica Andrés Bello, Caracas

Historia del Artículo

Recibido: 22 de enero de 2019

Aceptado: 23 de marzo de 2019

Disponible online: 07 de mayo de 2019

Resumen: La permacultura contempla el diseño y la puesta en práctica de una serie de principios generales que son aplicables en el campo de la agricultura urbana para la producción de alimentos orgánicos. Es un sistema que no solo involucra al sector agrícola sino que se extiende también en el ámbito social, político y económico en diversos tipos de comunidades y con especial énfasis a las que habitan en las ciudades. Este sistema se basa en los patrones y las características que presentan los ecosistemas en su medio natural y una buena parte de sus prácticas de forma consciente o fortuita han servido de insumo para la producción de los sectores agrícolas a pequeña escala en ambientes urbanos. El movimiento se origina a partir de los trabajos que realizaron en la década de los años 70 dos investigadores australianos: Bill Mollison y David Holmgren a los que se añadió un tercer exponente el japonés Masanobu Fukuoka quién realizó importantes contribuciones al desarrollo de las técnicas de siembra. La permacultura se basa en tres principios generales que le brindan un soporte ético: a) promover la conservación de los suelos, los bosques y el agua, b) fijar el foco de la atención en ocuparse primero de sí mismo, y luego de los familiares y de los otros integrantes de la comunidad y c) la repartición justa y equitativa de los bienes producidos y de velar por la reincorporación de una parte de los excedentes que se generan como aporte al mismo sistema, estableciendo unos límites razonables al consumo y a la reproducción. Se menciona con frecuencia en los artículos y textos que tratan sobre este tema que los principios de diseño que son la base conceptual de la permacultura, se derivan de la ciencia de la teoría de sistemas y de los fundamentos que plantea la llamada ecología profunda sin dejar de tomar también en consideración diversas técnicas que provienen de las prácticas agrícolas del período pre-industrial. El presente trabajo discurre a modo de ensayo donde el autor explora algunos puntos de encuentro entre los planteamientos que establecen la permacultura y su posible aplicación en el campo de la agricultura urbana.

Palabras Clave: permacultura, agricultura urbana, ecología profunda.

The contribution of permaculture in the development of urban agriculture

Abstract: Permaculture contemplates the design and implementation of a series of general principles that are applicable in the field of urban agriculture for the production of organic foods. It is a system that not only involves the agricultural sector but also extends socially, politically and economically in various types of communities and with special emphasis on those who live in cities. This system is based on the patterns and characteristics that ecosystems present in their natural environment and a good part of their practices in a conscious or fortuitous manner have served as input for the production of small-scale agricultural sectors in urban environments. The movement originates from the works carried out in the 70s by two Australian researchers: Bill Mollison and David Holmgren, to whom was added a third exponent, the Japanese Masanobu Fukuoka, who made important contributions to the development of planting techniques. . Permaculture is based on three general principles that provide ethical support: a) promote the

conservation of soils, forests and water, b) set the focus of attention on dealing first with oneself, and then with relatives and of the other members of the community and c) the fair and equitable distribution of the goods produced and of ensuring the reincorporation of a part of the surpluses that are generated as a contribution to the same system, establishing reasonable limits to consumption and reproduction. It is frequently mentioned in the articles and texts dealing with this topic that the design principles that are the conceptual basis of permaculture are derived from the science of systems theory and the fundamentals that the so-called deep ecology poses without leaving of taking also into consideration diverse techniques that come from the agricultural practices of the pre-industrial period. The present work runs as an essay where the author explores some points of encounter between the approaches that establish permaculture and its possible application in the field of urban agriculture.

Keywords: permaculture, urban agriculture, deep ecology.

I. INTRODUCCIÓN

Según el diccionario de Wikipedia la agricultura urbana es la práctica agrícola desarrollada dentro de un ambiente urbano y se aplica en actividades de producción de alimentos. Contribuye a la soberanía alimentaria y proporciona alimentos seguros de dos maneras: una de ellas es incrementando la cantidad de alimentos disponibles para los habitantes de las ciudades, y con la segunda provee verduras y frutas frescas para los consumidores urbanos

Debido a que promueve el ahorro de energía y la producción local de alimentos, la agricultura urbana y periurbana son actividades que aportan elementos valiosos para el desarrollo de comunidades sostenibles.

No obstante, este concepto involucra a un contexto mucho más amplio debido al modo en que operan su métodos ya que no solo se cultivan, procesan y distribuyen una diversidad de alimentos de origen vegetal, sino que además se utilizan y proveen una serie de recursos humanos y materiales, mediante el uso de productos y servicios que se encuentran en la misma zona y en sus alrededores, lo que involucra una serie de factores que no siempre se toman en cuenta.

Se puede notar que muchas de las definiciones de agricultura urbana, en términos generales, han descuidado un rasgo que le es característico y que hace que la agricultura urbana sea precisamente eso, una actividad de naturaleza urbana.

La agricultura urbana se diferencia de la agricultura rural, en el sentido de que está integrada al sistema económico y ecológico de las ciudades. Es necesario que se le otorgue una mayor importancia a esta dimensión y se la vuelva más operativa, de forma que el concepto se transforme en algo que sea más útil dentro de los dominios de los sectores científicos, tecnológicos y de política alimentaria [1].

La agricultura urbana es estimulada por una compleja red de factores, muchos de los cuales

todavía no son comprendidos a plenitud, como su relación con los niveles de la pobreza urbana y de la inseguridad alimentaria, algo que se debe tomar en cuenta para el caso de los pueblos de menores recursos, sino que también se hace presente en muchas de las metrópolis de los países más ricos que están rodeados de cinturones de miseria.

Se evidencia en este campo de estudio la necesidad de establecer y afianzar una serie de conceptos sobre bases consensuadas entre los entes involucrados, de forma que se establezca cual será el campo de acción y el alcance de este tipo de agrotecnologías, tratando de comprender sus complejas interacciones sociales e incluso antropológicas.

Los conceptos son más que entidades abstractas que buscan establecer los principios que rigen el mundo físico y social que nos rodea. En un sentido práctico son herramientas mentales que forjamos para poder entender mejor los fenómenos que forman parte del entorno, con el propósito ulterior de interactuar con ellos y modificar nuestras experiencias en el mundo real.

El marco conceptual que plantea el vínculo de la agricultura urbana con su entorno todavía no ha sido desarrollado en toda su extensión, ni en su debida profundidad y se requiere decodificar estas definiciones tanto en términos teóricos como operativos [2].

Siguiendo en este orden de ideas, como uno de los propósitos del presente artículo presentaremos una serie de elementos que tomamos de los principios que plantea la permacultura como un insumo tanto de enfoque práctico como teórico, para el diseño y la concreción de proyectos de agricultura urbana y periurbana [3].

La palabra permacultura viene de la fusión de los términos ingleses permanent agriculture (agricultura permanente) que acuñaron como un nuevo concepto Bill Mollison y David Holmgren en la década de los años 70 y que se basó también en la filosofía de la agricultura natural de Masanobu Fukuoka y se ha planteado como una respuesta positiva a la crisis ambiental y social que vivimos en estos tiempos.

La permacultura involucra una serie de elementos prácticos como el diseño y desarrollo de hábitats sustentables para el hombre y el ambiente, respetando los patrones y sistemas propios de los sistemas naturales. Los desarrollos de la permacultura se hacen frecuentemente sobre el terreno y se aplican para el rescate de los ecosistemas y para la restauración ambiental.

A pesar de que han transcurrido casi 50 años desde su creación, todavía algunos siguen considerando a la permacultura como una especie de jardinería sofisticada, sin embargo en nuestro criterio, esta fusión de arte y ciencia ofrece una serie de elementos que pueden ser valiosos a la agricultura urbana además de brindar un aporte conceptual al tema de la sostenibilidad urbana.

Según David Holmgren: "la permacultura es el diseño consciente de paisajes que imitan los patrones y las relaciones de la naturaleza mientras suministran alimento fibras y energía suficientes para satisfacer las necesidades locales. Las personas los edificios y la manera en que se organizan a sí mismos son fundamentales en la permacultura y de esta forma la visión original como una agricultura permanente ha llegado a evolucionar hacia toda una cultura de la sostenibilidad" [4]. Está basada en la observación de los ecosistemas naturales que junto con la sabiduría ancestral de los pueblos primitivos y el conocimiento científico busca como uno de sus objetivos crear sistemas que sean ecológicamente sanos y económicamente viables, que produzcan lo necesario para satisfacer sus necesidades, que no sobre-exploten sus propios recursos o los contaminen y que por lo tanto sean sostenibles en el largo plazo.

Como se puede intuir de los párrafos anteriores, la permacultura no sólo trata sobre los cultivos, es también una forma de vida y conjuga una serie de principios éticos como cuidar a la gente y compartir los recursos.

No se trata sólo de obtener alimentos, sino de que las personas trabajen juntas y cuiden unas de otras y además ofrece un campo de investigación sobre los circuitos que fomentan la vida basados en los principios de la teoría de sistemas, la autopoiesis y la ecología profunda.

Entre los objetivos centrales del presente trabajo se consideró en primer lugar el de introducir al lector no familiarizado con este campo en los aspectos fundamentales que plantea la permacultura, un segundo propósito es mostrar su contribución al tema de la agricultura urbana y por último brindar una aproximación a su uso mediante la implementación de algunas técnicas que ha desarrollado esta fusión de ciencia y arte a partir de otras disciplinas afines.

II. EL NACIMIENTO DE UN MOVIMIENTO AMBIENTALISTA

En la década de los 60, dos investigadores australianos Bill Mollison y David Holmgren se

dedicaron al estudio de los sistemas agrícolas que se mantenían estables en la isla de Tasmania, comparándolos con los métodos industriales que se empleaban en otros países para la producción agrícola a gran escala.

Estos dos investigadores al igual que otros colegas de su generación comprobaron que los métodos industriales dependían en un alto grado de una serie de recursos que además de que no eran renovables, contaminaban la tierra productiva y el agua disponible tanto para el riego, el consumo de los animales de cría y para el uso humano.

Otro efecto colateral de estas malas praxis era la drástica reducción de la biodiversidad en los terrenos que otrora eran campos fértiles. Como resultado de sus estudios y de su visión orientada al diseño de una nueva agricultura, publican en 1978 un primer libro titulado: *Permaculture One* [5].

Bill Mollison nace en Australia en 1928, y fue un profesional polifacético, biólogo, antropólogo, investigador, profesor de educación media y universitaria, naturalista, activista medioambiental, ganadero marino y cazador de tiburones. En 1981 recibe el Right Livelihood Award (un tipo de nobel alternativo) por su trabajo en diseño ambiental y en 2010 ganó el Premio Nacional Senior de Australia y fue nombrado como Icono Australiano del Milenio. Muere en el 2016 a la edad de 88 años.

El segundo personaje emblemático del movimiento permaculturista es David Holmgren nacido en 1955, todavía vivo y muy activo a sus 63 años. Se formó como ecólogo, ingeniero de diseño ecológico y escritor. Actualmente preside la empresa consultora Holmgren Design Services.

Este movimiento que promueve un tipo de vida sostenible se recrea en una serie de experiencias previas que le sirvieron como aportes a los fundamentos de su teoría. Entre los antecesores del movimiento se encuentra Joseph Russell Smith que publicó en 1929 un libro titulado "*Cultivos arbóreos: una agricultura permanente*", donde presenta los resultados de su larga experiencia cultivando árboles frutales [6].

Smith llegó a interpretar el mundo de una forma holística como un todo interrelacionado de las partes, su libro estimuló el trabajo de dos investigadores japoneses: Toyohiko Kagawa una de las pioneras en el cultivo de los bosques en Japón en la década de 1930 seguida por su coterráneo Masanobu Fukuoka que en la misma década, comenzó a abogar por las técnicas de siembra directa promoviendo lo que él llamó la labranza cero.

Masanobu nace en 1913 y fallece en su Japón natal en el 2008, fue un agricultor, edafólogo, fitopatólogo y filósofo. Autor de varias obras entre ellas: "*La Revolución de una Brizna de Paja*," "*La Senda natural del Cultivo*" y "*La única revolución*". En 1988 recibe el Premio Ramón Magsaysay en la categoría

de Servicio Público, (equivalente al Premio Nobel asiático). El ideó una forma de cultivo a la que llamó "agricultura natural", que no sólo configuró filosóficamente, sino que también practicó a través del llamado método Fukuoka [7].

Este método traspasó las fronteras del Japón y terminó sirviendo como una referencia dentro de agricultura natural en el mundo y en especial en el campo de la permacultura. Fue el creador del método de siembra de semillas Nendo Dango con esferas de arcilla del que hablaremos más adelante.

Otro de los elementos claves en los cuales se centra la Permacultura es en el buen uso del agua, y eso en parte se debe a uno de los antecesores del movimiento otro australiano de apellido Yeomans que publica en 1964 el libro "*Agua para Todas las Granjas*" que sirvió de base para muchos sistemas de riego que se utilizan todavía en varias regiones del planeta [8].

En la década de los 80, el concepto se fue ampliando en dirección al diseño de hábitats humanos sostenibles. Bill Mollison se dedicó a promover las enseñanzas por diversas regiones del planeta en más de 80 países y publicó los célebres manuales que están ampliamente difundidos hoy en día. Al respecto, el Alto Comisionado de Naciones Unidas para los Refugiados (ACNUR) ha elaborado un informe sobre el uso de la permacultura en situaciones de refugio, tras su exitoso uso en los campos de Sudáfrica.

III. LOS TRES PRINCIPIOS ÉTICOS DE LA PERMACULTURA

David Holmgren ideó una ética aplicada a la permacultura basada en tres principios fundamentales:

- *Cuidar de la tierra*

Implica el uso y manejo responsable de los recursos que nos ofrece la vida en nuestro planeta, y que se expresa a través de un conjunto de sistemas complejos, interdependientes, que están en proceso de evolución permanente modificándose a través de los flujos de materia y de energía que suceden en los ciclos naturales.

- *Cuidar de las personas*

Involucra un contenido de orden social donde todos los seres humanos tienen el derecho al acceso a los recursos materiales y al conocimiento e implica también un equilibrio entre el sentido de libertad y al mismo tiempo el de responsabilidad. Como nadie puede aportar un bien que no dispone el cuidado de las personas debe comenzar por uno mismo. Una de las primeras decisiones éticas es la de asumir la responsabilidad sobre la propia existencia y luego cuidar del legado que transmitiremos a nuestros

descendientes. Siempre se trabaja con el principio de la cooperación considerando que la base de la vida en la naturaleza es la cooperación y la sinergia y no la competencia.

- *La redistribución de los excedentes productivos*

Este tercer principio toca la dimensión económica de la sostenibilidad y establece no solo un límite razonable al crecimiento demográfico sino también promueve la reducción del consumismo desmedido, un comportamiento que se ha transformado en una patología de nuestros tiempos y por otra parte el tratar de lograr que no se siga incrementando más la población mundial en una forma exponencial. En primer lugar, se debe trabajar para que todos los sistemas vitales sigan existiendo y puedan multiplicarse y crecer, procurando que todas las personas reciban lo que necesitan para garantizar su existencia.

Dentro de los enfoques teóricos de la permacultura se incluyen elementos de la Autopoiesis formulada por Humberto Maturana y Francisco Varela en su libro *El árbol del Conocimiento* publicado en 2003 [9]. Esta obra propone cambiar el sistema patriarcal destructivo que está utilizando casi toda nuestra energía, inteligencia y nuestra fuerza vital para poder usarlos de una forma más consciente en favor de la creación de una cultura centrada en la vida. Esta nueva subcultura tendría una orientación de corte más matriarcal lo que conduciría a una sociedad más equilibrada, pacífica y sin marcadas jerarquías. La permacultura toma en cuenta también algunos elementos distintivos de la denominada Ecología Profunda que promueve en sus inicios el físico Fritjof Capra en su obra *La Trama de la Vida* publicado en 2006. Como elemento de esta corriente filosófica se tendrá cuidado no solamente en mantener y promover la diversidad de los seres vivos y que estos encajen bien en los diferentes ecosistemas, sino también que cada ser pueda desarrollar todas sus potencialidades creando de forma consciente espacios vitales para todas las especies y facilitando las interacciones entre ellas [10].

Un tercer elemento que contribuye como basamento teórico a la permacultura proviene de la Teoría de Sistemas. Se trata de entender a la naturaleza y de copiarla, de diseñar partiendo de los patrones hacia los detalles orientándose con lo que ya existe. De integrar en vez de segregar fomentando así las potencialidades de todas las formas de vida. Se trata de forma consciente de buscar las soluciones que se encuentran en lo pequeño, en lo lento y en lo descentralizado y se fomenta incrementar la biodiversidad y el desarrollo en las zonas periféricas. Se prepara al individuo para que pueda actuar de forma creativa y para que acepte los cambios en los ciclos vitales y los acompañe.

Se trata de vivir la “topía” en vez de la “utopía”, el momento presente el aquí y el ahora, en vez de solo soñar con un ambicioso proyecto futuro, hay que reconocer lo que existe ahora en vez de desvalorizarlo y sobreponer el materialismo matriarcal al idealismo patriarcal.

IV. La Flor de la Permacultura y el portafolio de sus aplicaciones

La trayectoria del modo de acción de la permacultura comienza partiendo de la ética y de sus principios de diseño y se mueve a través de una serie de campos de acción que se consideran como claves para poder recrear un futuro sostenible. Estos campos están conectados por un camino evolutivo que se representa en forma de una espiral conocida como “La Flor de la Permacultura” (Figura 1). Este proceso parte en un comienzo a un nivel personal y local, para después extenderse a los niveles del colectivo [11].

Cada uno de los “pétalos de la flor” corresponde a un aspecto macro que se debe tomar en cuenta y que hay que desarrollar de una manera sinérgica en conjunción con las otras dimensiones. Al igual que sucede en los ecosistemas todos los campos de una forma u otra están interconectados. Así como es vital la educación para el mantenimiento de la salud física y mental de la población y para la prevención de las enfermedades es un elemento indispensable para poder generar y transmitir el conocimiento lo que a su vez potencia el desarrollo tecnológico algo que debería conducir al uso más racional de los recursos que ofrece la tierra.



Figura1: La Flor de la Permacultura. **Fuente:** Tomado de: https://permacultureprinciples.com/downloads/Pc_Flower_Poster_ES.pdf

El efecto se logra cuando los recursos llegan a los que más los necesitan y eso se logra solo si se puede garantizar una repartición más justa de la tierra y una participación equitativa en las ganancias, acompañado de una distribución equitativa de los excedentes de la producción.

Como resultado de la interacción de los distintos campos de la flor (pétalos), las distintas dimensiones se materializan en un conjunto de posibles aportes a

la solución de los problemas de diversa índole que enfrentan las comunidades.

La (Tabla I) muestra un conjunto de aplicaciones, actividades, técnicas, productos, y servicios en cada uno de los campos que contempla la Flor de la Permacultura.

Tabla I: Aplicaciones de la permacultura. **Fuente:** Elaboración propia

APLICACIONES DE LA PERMACULTURA	
Construcción	Iluminación de los edificios por luz solar. Sistemas de ventilación pasiva. Uso de materiales de construcción a partir de fuentes naturales. Buen manejo del agua y el reciclaje de los desechos. Sistemas de descarga de bajo volumen de líquido. Aplicación de la Biotectura. Construcción autogestionada.
Herramientas y Tecnología	Reciclaje creativo. Empleo de herramientas manuales y de técnicas tradicionales. Uso generalizado de la bicicleta. Transporte compartido. Hornos solares. Obtención de combustibles a partir de desechos orgánicos como el aceite residual. Combustibles de lignocelulosa. Producción de biochar para acondicionar los suelos. Uso de estrategias de cogeneración. Diseño de microturbinas hidroeléctricas y de edificios inteligentes. Uso de micro paneles fotovoltaicos como fuentes de energía localizada.
Educación y Cultura	Diseño de programas de educación en casa. Modelo de educación Waldorf. Desarrollo de artes plásticas y de música participativa. Aplicación de los métodos de investigación activa.
Salud y Bienestar Espiritual	Promoción del parto natural y del proceso de amamantar al recién nacido. Uso de las técnicas y del conocimiento proveniente de la medicina complementaria e integral. Yoga, Tai Chi y otras disciplinas que relacionan el trinomio del cuerpo/mente/espiritu de tradición oriental. Retomar las tradiciones de las culturas indígenas primigenias que conectan con lo espiritual y los valores culturales arraigados en la tierra. Dejar que las personas puedan morir con dignidad.
Finanzas y Economía	Aplicación de sistemas monetarios sin interés con alcance local y regional. Acuerdos para compartir vehículos propios y en alquiler desarrollo y la proliferación de mercados populares con productos locales de agricultura orgánica. Desarrollo del trabajo agrícola de tipo voluntario y del turismo agrario. Comercio e intercambio de cuotas negociables de energía, cupos de carbono. Comercialización en base al ciclo de vida de los productos y del nivel de energía real incorporada en su fabricación. Promover campañas en contra de la obsolescencia programada.
Tenencia de la Tierra y Gobernanación Comunitaria	Estimular la creación de cooperativas y de corporaciones. Promover el desarrollo de Eco-aldeas donde se facilite el poder compartir viviendas bajo la figura de propiedades colectivas. Tecnología del Espacio Abierto y toma de decisiones por consenso.
Administración de la Tierra y de la Naturaleza	Desarrollo de huertos bio-intensivos del control biológico de plagas. Producir alimentos de árboles y plantas perennes y anuales en un sistema que imita a un bosque natural. Promover la recolección y conservación de semillas. Aplicación de la acuicultura integral. Recolección de alimentos desperdiciados por la producción comercial.

V. CINCO CONCEPTOS DE LA PERMACULTURA QUE PUEDEN SER APLICADOS EN LA AGRICULTURA URBANA

- *El concepto de patrón*

El uso de patrones de siembra es uno de los rasgos propios de los desarrollos permaculturales que involucran al sector productivo agrícola. [12]

El principio que trasciende detrás de estos patrones es el de copiar una serie de figuras geométricas sobre el terreno, partiendo de la observación de la gama de patrones que existen en la naturaleza. El propósito que se encuentra subyacente con esta técnica es el de maximizar la cantidad y variedad de las interacciones entre los diversos elementos que integran el cultivo, no solo en lo que se refiere a las plantas y a su sustrato sino también a el ecosistema completo que cohabita en el microecosistema.

La presencia de espirales en los cultivos es de uso frecuente, aunque no es el único patrón disponible dentro de la gama de posibilidades.

El patrón de espiral se aprecia desde el movimiento del aire y el agua en los huracanes hasta el diseño de los caracoles. Este tipo de diseño crea un microclima en el que se siembran las plantas de acuerdo a sus necesidades de sol y de humedad y permite tener múltiples direcciones de irradiación solar durante el fotoperíodo. Este tipo de disposición también ayuda a mantener diferentes condiciones de humedad en el suelo.

Si la espiral se diseña contorneando en forma de un montículo las plantas sembradas en la parte superior serán las especies con menor requerimiento de agua, mientras que la plantas que se siembran en la parte más baja del montículo suelen ser las variedades que requieren mayor irrigación.

Es frecuente encontrar en países como México otro tipo de patrón que se denomina chinampas, y que consta de un sistema de cuadrículas de tierra surcado por una serie de canales que incrementan el efecto de borde tierra-agua lo que a su vez aumenta la productividad de los cultivos. Se ha comprobado en diversos cultivos que cada vez que colindan medios de naturaleza diferente y se forma un borde de confluencia se diversifica el número de especies.

Otro tipo de patrón que es muy común en la naturaleza es el de ramificación. Este patrón se repite en la distribución de las ramas de los árboles y en sus raíces y varía en el ancho y la profundidad de los surcos que se distribuyen sobre el terreno al igual que sucede en los ríos.

En el caso de los la proliferación de macro y micro fauna depende del ancho y de la profundidad del

ramal. La distribución de especies animales y vegetales en los diferentes niveles de ramificación está limitada por el oxígeno, el espacio y los nutrientes.

Se observan también variaciones por efecto de la topografía del terreno, por ejemplo en el curso alto del río el agua se oxigena por caídas y por el movimiento (remolinos) mientras que en la parte baja y plana se forman meandros, con curvas grandes, donde la parte externa va más rápido que la parte interna, lo que forma remolinos y oxigena el agua.

- *El concepto de capas*

La estructura en forma de capas constituye otra de las herramientas que se utilizan frecuentemente para diseñar ecosistemas funcionales sostenibles. Un ecosistema maduro tiene un gran número de relaciones entre sus partes componentes. Debido a que las plantas crecen a diferentes alturas, una comunidad diversa es capaz de crecer en un espacio relativamente pequeño. Este tipo de enfoque permite el crecimiento de diversas especies de plantas siguiendo un patrón vertical.

Este tipo de herramienta se basa en los conocimientos provenientes de la denominada agroforestería que es una variante de la jardinería forestal que ha sido adaptado como un sistema sustentable para la producción de alimentos basado en el cultivo de plantas de bajo mantenimiento.

Uno de los componentes claves del sistema es la denominada estructura de siete capas en la que participan en orden descendente: árboles frutales, árboles de nueces, arbustos, hierbas y verduras hongos y líquenes y por último en el nivel inferior del subsuelo actúan las lombrices como procesadoras del material orgánico y productoras de humus [13].

Aplicando el enfoque de asociación de cultivos (gremios), la diversidad de especies de plantas pueden entremezclarse para crear una sucesión de capas y así poder formar un hábitat que suele ser muy productivo.

Uno de los pioneros de este tipo de desarrollo fue Robert Hart, que le dio el nombre de "jardinería forestal". Hart comenzó con este tipo de estrategia en Inglaterra, desde inicios de la década de 1980. Su enfoque se inspiró en parte por su observación de los huertos familiares en Kerala (India).

Bill Mollison, a quien ya mencionamos como uno de los fundadores de la permacultura visitó a Robert Hart en su jardín forestal en 1990 y desde ese entonces, el sistema de siete capas propuesto por Hart ha sido incorporado como un elemento común de diseño en la permacultura [14].

Los jardines forestales son probablemente una de las más antiguas formas de uso de la tierra y uno de los agroecosistemas más resilientes.

En el norte de África, los oasis son otro ejemplo de la jardinería forestal aplicando la estrategia de estratos o capas, incluyen con frecuencia a las palmeras altas que producen dátiles y dan sombra, los árboles frutales en la capa intermedia y las legumbres en la capa más baja. Desde el punto de vista agroforestal, quizás el país más avanzado del mundo sea el estado indio de Kerala, que cuenta con no menos de tres millones y medio de jardines forestales.

- *El concepto de gremios*

Un gremio es un grupo de especies en las que cada una de las integrantes del conjunto proporciona una serie de funciones, que pueden ser específicas o diversas y que actúan en armonía con las otras especies que cohabitan con ellas, en ese caso se les suele denominar con el término de gremios de apoyo mutuo. En este sentido, las interacciones entre las plagas y las funciones de las distintas especies de plantas involucradas son de gran importancia en la combinación de los cultivos. Dentro de este concepto, se toma en cuenta también las relaciones que se establecen con el mundo animal (insectos, anélidos, etc.) y con la microbiología del suelo.

Los gremios incorporan se incluyen plantas que se cultivan específicamente para la producción de alimentos, y también se incluyen otras especies vegetales que poseen raíces primarias lo que les permite extraer los nutrientes desde las profundidades de la tierra, otras participan en el gremio por el hecho de que fijan el nitrógeno en el suelo, ciertas plantas atraen insectos benéficos, y otras repelen los insectos dañinos. Cuando se agrupan juntos en un consorcio mutuamente beneficioso forman un gremio de apoyo mutuo.

En la permacultura los gremios están conformados por una asociación cercana de especies que se agrupan alrededor de un grupo central. Esta asamblea actúa en relación con el elemento central para asistirle a nivel de salud, ayudar en el manejo del cultivo o para amortiguar efectos medioambientales adversos en la zona.

Entre los posibles beneficios que aporta la estrategia de gremios de apoyo mutuo se pueden incluir: la reducción de la competencia radicular de las hierbas invasoras, la cobertura física contra las heladas, las quemaduras por el exceso de radiación solar o los efectos deshidratantes del viento [15].

- *El concepto de efecto de borde*

El efecto de borde se genera mediante la yuxtaposición de ambientes contrastantes en un

ecosistema. Los permaculturistas argumentan que donde los sistemas que son muy diferentes se encuentran hay un área de intensa productividad y se crean una serie de conexiones que pueden ser muy útiles en términos de variedad y de productividad de los cultivos [16].

Esta técnica se desarrolla en los diseños permaculturales, utilizando los diseños en forma de espirales que ya se mencionó y por la creación de estanques con “costas ondulantes” en lugar de un simple diseño de figuras geométricas como círculos y óvalos con el propósito de incrementar el perímetro de borde para un área dada.

Los efectos de borde crean fragmentación de hábitats y la magnitud de sus efectos son muy marcados cuando los hábitats han sufrido una fragmentación severa; en estos casos el efecto puede llegar a ser contraproducente y puede ocurrir lo contrario de lo que se pretende disminuyendo la biodiversidad.

La fragmentación de hábitat es un proceso de cambios ambientales importante para la evolución y la biología de la conservación. Usualmente es definida como aquel proceso en el cual una gran extensión de hábitat es transformada en un número de parches más pequeños que se encuentran aislados entre sí por una matriz con propiedades diferentes a la del hábitat original.

El proceso de fragmentación genera paisajes y fragmentos con determinadas características, que en su conjunto describen los atributos espaciales del hábitat.

Estas características se pueden agrupar en cinco categorías que en conjunto y/o de forma individual pueden afectar la viabilidad y el éxito del cultivo: el área del fragmento, el efecto de borde, la forma del fragmento, el aislamiento de los fragmentos y la estructura que permanece intacta en la matriz. Se hace casi evidente que se requiere de experiencia y un considerable grado de experimentación para lograr los resultados óptimos al aplicar este tipo de estrategia como herramienta.

- *El concepto de siembra aplicando la técnica de pildorización (Nendo Dango)*

El significado del término Nendo Dango acuñado por Fukuoka viene de la conjunción de la palabra Nendo que se relaciona con la división del tiempo o las épocas en japonés mientras que Dango, es el nombre de una comida japonesa, compuesta de una esfera elaborada con mochiko que se fabrica con harina de arroz y que se suele servir acompañando el té verde.

Esta esfera tiene el tamaño y la forma de una bola de ping pong, y fue la fuente de inspiración que guió a Masanobu Fukuoka al desarrollo de un

procedimiento de siembra que a su vez le condujo a una serie de ensayos a nivel internacional, con el logró en buena medida de un mayor nivel de proliferación y de crecimiento de la población vegetal en las zonas áridas de varios países.

Las esferas de arcilla (píldoras) contienen en su interior un conjunto de semillas de varias especies que fueron escogidas en base a sus características particulares que les conducen a establecer una relación cooperativa desde el momento de su germinación siguiendo la estrategia de gremios que mencionamos antes.

Esta técnica no es nueva, ya se utilizaba antiguamente en el Oriente Medio, en Egipto y en África. Masanobu Fukuoka la redescubrió y la fue desarrollando durante 60 años como un método de agricultura natural para frenar la desertificación.

La técnica que propone Fukuoka para la producción del Nendo Dango recibe el nombre técnico de pildorización. Este sistema consiste en embadurnar semillas en una capa de arcilla y haciendo bolas de un grosor determinado que dependen del tamaño de las semillas [17].

El fin es el de mantener las semillas protegidas una vez que es depositada en el terreno y evitar así que sea alimento de pájaros, roedores u otros animales. Las semillas recubiertas por la capa de arcilla permanecen en la espera de la época lluviosa, en ese momento la arcilla absorbe el agua y la semilla la utiliza para poder germinar rompiendo la cápsula que la contenía. Este sistema es mucho más eficiente, según Fukuoka, que los métodos tradicionales de reforestación.

Existen dos métodos de pildorización: el sistema manual y el mecánico.

El primer paso en ambos métodos es llevar a cabo la selección apropiada de las semillas. La mezcla de semillas que generalmente se usa en esta técnica está compuesta en general por un 50 % de variedades de especies de frutales y forestales, un 30% de variedades de hortalizas y un 10% de tipos de cereales el 10% restante se completa con otras especies de plantas como las leguminosas que incrementan los niveles de nitrógeno en el suelo.

El procedimiento consiste en hacer una mezcla de semillas con arcilla cribada y agua y el resultado final que conduce a la germinación de las semillas depende de varios factores entre los que hay que tomar en cuenta entre otros el tipo de arcilla y el clima de la región donde se efectúa la siembra.

Una vez que se secan a la sombra las bolitas son esparcidas sobre la superficie del terreno.

En el sistema mecánico la etapa de elección de semillas y de arcilla se hace igual que en el proceso manual solo cambia la escala y para el mezclado se utiliza una máquina de fabricar hormigón de tipo convencional tomando la precaución de retirarle las aspas.

El proceso se debe hacer lentamente, se van añadiendo poco a poco la arcilla y el agua y en algunos casos se incorporan como aditivos papel triturado o algodón a la mezcla para darle una mayor plasticidad a las bolitas sobretodo en caso que se quiera realizar la reforestación desde aviones o helicópteros.

V. CONCLUSIONES

Intentar confinar una parte de la producción agrícola en un ambiente tan hostil como son las ciudades sin lugar a dudas plantea un reto de considerable alcance. Si bien el tema no es novedoso se ha evidenciado un desarrollo importante de este campo de estudio en las décadas recientes.

Dentro de la gama de retos que se plantean con el tema de la agricultura urbana está el de lograr aprovechar al máximo el terreno disponible y de potenciar la cooperación entre la diversidad de especies que se pueden cultivar en estos ambientes "artificiales".

Otro aspecto que se debe tomar en cuenta **es el** de la productividad de forma que el rendimiento por hectárea permita que el nivel de la producción sea atractivo y así poder resarcir el esfuerzo empleado.

A lo largo del desarrollo de este artículo, pudimos comprobar que la permacultura, al igual que cualquier otra cultura, involucra un término bastante difícil de poder definir en pocas palabras, y nos aventuramos a considerar que una buena parte de esa dificultad se debe a su naturaleza compleja.

La vida ciertamente es un sistema complejo, debido a sus múltiples asociaciones y a las interacciones que se generan entre los distintos niveles de organización partiendo del nivel molecular al celular, desde este al tisular proyectándose de los órganos a los individuos y de estos a las comunidades y a los ecosistemas con efecto final de nivel planetario.

La Hipótesis Gaia propuesta por Margullis y Lovelock en los años 80 invirtió el paradigma que hasta ese momento se encontraba vigente, al menos en occidente: cuando en el planeta que compartimos con otras especies llegó a presentar las condiciones aptas para la vida esta surgió como un simple corolario de alguna ecuación quizás de carácter no determinista.

Para bien de la ecología y del planeta, hoy compartimos otro tipo de visión y es muy probable que el fenómeno que llamamos vida haya sido responsable de cambiar las condiciones del planeta logrando así su proliferación y su evolución. Tal vez el pensar de esta forma nos permita lograr

aportes novedosos y avances más significativos en el desarrollo de los cultivos en zonas urbanas, apoyándonos en los viejos y en los nuevos conceptos de esta mezcla de arte y de ciencia que plantea la permacultura.

REFERENCIAS

- [1] Fundación CIARA (2012) "El proyecto de desarrollo y consolidación de la agricultura urbana".. http://www.ciara.gob.ve/agricultura_urbana.htm
- [2] 2. Fernández de Casadevante, J.L. (2011) "Huertos comunitarios: sembrando otras formas de habitar la ciudad". *El ecologista*, nº 70, pp. 43-47
- [3] Moran Alonso, N; Hernández Aja, A. (2011) "Historia de los huertos urbanos: de los huertos para pobres a los programas de agricultura urbana ecológica ". En: *Actas del I Congreso Estatal de Agricultura Ecológica Urbana y Periurbana*. Valencia: SEAE, 12 p.
- [4] Holmgren, D. (2013) "Permacultura. Principios y Senderos más allá de la Sustentabilidad". Kaicron.
- [5] Mollison, B. y Holmgren D (1978) " Permaculture One" . Transworld Publishers (Australia) .
- [6] Smith J.R. (1929) "Cultivos arbóreos: una agricultura permanente", 1929 citado en : <https://hisour.com/es/permaculture-40380/>
- [7] "El trabajo de Masanobu Fukuoka". Publicado por EcoHabitar en 5 diciembre, 2011
- [8] Yeomans, P.A.(1973) " Water for Every Farm: A practical irrigation plan for every Australian property" K.G. Murray Publishing Co. Pty, Ltd, Sydney, N.S.W., Australia.
- [9] Maturana H y Varela F (2003) " El árbol del conocimiento. Las bases biológicas del conocimiento humano" Lumen Editorial Universitaria. 208 p.
- [10] Capra F. (2006) "La Trama de la Vida: Una nueva perspectiva de los seres vivos". Editorial Anagrama, Colección Argumentos. 368 p.
- [11] "La Esencia de la Permacultura". Asociación Cambium PermaCultura. Barcelona. España. Citado en: https://files.holmgren.com.au/downloads/Essence_of_Pc_ES.pdf
- [12] Holmgren D " La Esencia de la Permacultura " Resumen de los principios y los conceptos generales Citado en : http://www.tierramor.org/PDFDocs/EsenciaPC_EBook.pdf
- [13] Bruce, J. W. (1996). "Cultivo de árboles, economía doméstica y seguridad alimentaria". Seguridad alimentaria familiar y silvicultura: análisis de los problemas. Análisis de los problemas socioeconómicos. Roma: FAO.
- [14] Hart, R. (1982) "Forest Gardening ". Green Books (UK)
- [15] Williams, SE; Hero, JM (1998). "Rainforest frogs of the Australian Wet Tropics: guild classification and the ecological similarity of declining species". *Proceedings. Biological sciences (The Royal Society)* 265 (1396): 597-602. doi:10.1098/rspb.1998.0336. PMC 1689015. PMID 9881468.
- [16] Peña J.; Monroy ; Alvarez F y Orozco M. (2005) " Uso del efecto de borde de la vegetación para la restauración ecológica del bosque tropical" D.R. © TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 8(2):91-98.
- [17] 17. Fundación + Arboles (2018). Manual de reforestación con Nendo Dango. Citado en: <http://www.masarboles.org/es/manual-nendo-dango/>

El Biodiesel de Microlagas

¿Una Alternativa Adecuada para el Sector Energético?

Rafael Muñiz¹,
rmuniz53@gmail.com¹

1 Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería (CIDI). Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, Venezuela.

Historia del Artículo
Recibido 03 de Julio de 2017
Aceptado 14 de Julio de 2017
Disponible online: 14 de Julio de 2017

Resumen: Las microalgas son organismos eucariotas que se encuentran en la naturaleza con una amplia diversidad de taxonomías creciendo de forma autotrófica y heterotrófica. Son muy eficientes en la fijación de CO₂, el principal agente responsable del efecto invernadero, por lo que sus cultivos podrían contribuir como un recurso valioso para controlar las emisiones de este gas en el planeta. El uso de las microalgas como biocombustible presenta una serie de ventajas en comparación con los que provienen de otros cultivos. Su aceite produce una combustión más limpia que la de los combustibles fósiles y en el caso de que ocurra un derrame, genera una menor contaminación en el ambiente al degradarse en un tiempo menor. No obstante, el cultivo de las microalgas a nivel industrial, presenta una serie de dificultades por el elevado costo del proceso y la inestabilidad de los cultivos debido a las condiciones variables del entorno y a la contaminación del medio nutritivo con otros microorganismos. En el presente trabajo se realizara una revisión de la literatura que involucra aspectos relacionados con la tecnología de microalgas y con el procesamiento de sus extractos a nivel industrial con el fin de producir biodiesel, estableciendo el alcance y las limitaciones de dicha técnica como una alternativa al uso de los combustibles fósiles.

Palabras Clave: Energías alternativas, Biodiesel, Microalgas.

Abstract: Microalgae are eukaryotic organisms found in nature with a wide variety of taxonomies growing in an autotrophic and heterotrophic form. They are very efficient in fixing CO₂, the main agent responsible for the greenhouse effect, so their crops could contribute as a valuable resource to control the emissions of this gas on the planet. The use of microalgae as biofuel presents a number of advantages compared to those from other crops. Its oil produces cleaner combustion than that of fossil fuels and in the event of a spill, it generates less pollution in the environment as it degrades in a shorter time. Nevertheless, the cultivation of microalgae at the industrial level presents a series of difficulties due to the high cost of the process and the instability of the crops due to the variable conditions of the environment and the contamination of the nutrient medium with other microorganisms. This paper will discuss some aspects related to microalgae technology and the processing of extracts at the industrial level in order to produce biodiesel, establishing the scope and limitations of this technique as an alternative to the use of fossil fuels.

Keywords: Alternative energy, Biodiesel, Microalgae

I. INTRODUCCIÓN

Como es del conocimiento público, se evidencia en todo el planeta un cambio en las condiciones climáticas cuya magnitud es de tal importancia que se incluye en la agenda política de los países y de las organizaciones internacionales. Este cambio climático entre sus múltiples efectos causa tanto sequías como inundaciones siendo la actividad humana su principal responsable, en particular debido a la contaminación causada por la quema de los combustibles fósiles.

Como un recurso para prevenir las consecuencias que genera la contaminación, se plantea el desarrollo de tecnologías limpias que se orienten a la preservación del medio ambiente, que permitan la reutilización de los residuos y que al mismo tiempo generen fuentes de energía de bajo costo

Entre las tecnologías disponibles para mitigar los efectos del cambio climático los cultivos de microalgas constituyen un recurso valioso, ya que reciclan de forma eficiente los contaminantes presentes en los medios líquidos y gaseosos al incorporarlos con su metabolismo a la biomasa del alga.

Desde comienzos de la década de los 50, se conocen reportes sobre el uso de microalgas mantenidas en cultivo a partir del agua de efluentes como una fuente de biomasa para la producción de metano. [1]

A inicios de la década de los 70, se plantea a nivel mundial la búsqueda de otras fuentes alternativas de energía. El interés en ese campo, se debía por una parte a la toma de conciencia sobre los problemas ambientales que generan los combustibles fósiles y por otra, como un resultado de la crisis energética mundial debida al elevado precio de este tipo de combustibles.[2]

Entre las alternativas disponibles para tratar de solventar el problema energético se encontraba la de desarrollar en gran escala la biotecnología de microalgas orientada a la producción de biocombustibles. La idea surge en los Estados Unidos al aplicar a los cultivos de microalgas corrientes de CO₂ generadas por la quema del carbón como un recurso para depositar el gas y que al mismo tiempo aportara una fuente de carbono para mantener el cultivo del alga. [3]

El denominado programa de especies acuáticas que se desarrolló también en los Estados Unidos desde finales de la década de los 70 hasta los años 90, cumplió con el objetivo de investigar entre las distintas especies de microalgas cuales podrían funcionar mejor para la producción de biocombustibles.

Aunque no se pudo encontrar una especie de microalga ideal para la producción de biocombustible, sí se logró identificar una amplia gama de especies, en su mayoría presentes en aguas continentales que eran capaces de almacenar aceites en niveles significativos y que mostraban además una muy buena tasa de crecimiento. [4]

En el curso de las décadas siguientes, entre los años 80 y 90 ,se prosigue con los estudios a gran escala logrando mantener cultivos en sistemas abiertos con un buen rendimiento de biomasa por períodos de un año.

En esa época fue célebre el desarrollo que se llevó a cabo en Roswell, Nuevo México, donde se alcanzaron densidades de cultivo que superaron los 50 gramos de masa por m² por día, obteniendo una tasa de captura del CO₂ de más del 90%. Este fue un logro considerable a pesar de las limitaciones que ocasionaba la disminución en la tasa de crecimiento de las microlagas debido a la baja temperatura nocturna del desierto. [5]

Las microalgas son organismos fotosintéticos microscópicos que crecen en ambientes acuáticos marinos y de agua dulce aunque se conocen especies terrestres. Los biólogos las han clasificado y caracterizado en diferentes grupos basándose en la pigmentación, su ciclo de vida, morfología, fisiología, genoma y su metabolismo. [6]

Se estima que existen unas 30000 especies de microlagas aunque solo unas 4000 han sido clasificadas. Los ficólogos las ubican en alguno de los siguientes grupos: algas verdes [Chlorophyceae], diatomeas [Bacillariophyceae], algas verde-amarillentas [Xanthophyceae], algas doradas [Chrysophyceae], algas rojas [Rhodophyceae] y algas pardas [Phaeophyceae]. Los biotecnólogos acostumbra incluir entre los grupos a las cianobacterias [Cyanophyceae] y a los dinoflagelados [Dinophyceae] aunque en sentido formal no se les clasifican como microalgas. [7]

En términos de la producción de biocombustibles, las microalgas más estudiadas son las diatomeas y las algas verdes, la investigación en este campo se ha enfocado en unas 300 especies capaces de producir cantidades significativas de aceite. [8]

II. EL BIODIESEL: ALCANCE Y LIMITACIONES

Los biocombustibles se pueden obtener a partir de un amplio rango de productos agrícolas y forestales. La oferta en el mercado se concentra en dos tipos de productos: el bioetanol como un sustituto o complemento de la gasolina y el biodiesel para uso en el transporte pesado y en la industria.

Las principales fuentes energéticas para la producción del bioetanol son los cultivos de maíz y de caña de azúcar, mientras que la materia prima para el biodiesel proviene en general de cultivos de soya, de jatropha, de colza y de los aceites que se extraen de la palma y de ciertas especies de microalgas.

El biodiesel pertenece a un conjunto de combustibles que se emplean en fase líquida como biocarburantes y que se obtienen mediante procesos de transesterificación a partir del aceite que se extrae de la biomasa vegetal y de las grasas animales y que se usa como sustituto total o parcial de los combustibles fósiles. [9]

El biodiesel que se encuentra disponible en forma comercial hoy en día, se considera como biocombustible de primera generación y para su producción se cuenta con una tecnología bastante bien desarrollada que utiliza como materia prima los aceites vegetales. El biodiesel que se obtiene a partir de las microalgas se considera como un combustible de segunda

generación y se produce todavía a nivel experimental y en cantidades limitadas. .

Al igual que sucede con el impacto de otras tecnologías, se presentan oportunidades pero también riesgos asociados al desarrollo de los biocombustibles que dependen de varios factores, entre los cuales se encuentran, el tipo de cultivo que sirve como fuente de materia prima, la tecnología utilizada para la conversión del biocombustible y además en gran medida de cuáles son las políticas y los incentivos fiscales que se apliquen para promover el desarrollo de esta industria. [10]

Se han planteado frecuentes debates en torno al impacto que pudiera generar el crecimiento del mercado de los biocombustibles y su efecto sobre la seguridad alimentaria de los países. [11]

Otro de los elementos que afectan en gran medida al mercado de los biocombustibles lo constituyen las fluctuaciones que experimenta el precio del petróleo y que compromete la competitividad del sector debido a sus costos elevados de producción.

Desde los inicios del presente siglo, la producción de biocombustibles ha crecido a un ritmo anual de un 10% con una composición de un 80% de bioetanol y 20% de biodiesel, logrando una participación en el mercado de los biocombustibles que alcanza un 1,5% del combustible total empleado para el sector del transporte.[12] [13]

La proyección de mercado de biocombustibles del 2010 señalaba que solamente en cinco países se concentraba más del 60% de la producción mundial del biodiesel: Estados Unidos, Argentina, Alemania, Francia y Brasil.

Los costos de producción del biodiesel varían considerablemente en función de la fuente de materia prima, el método que se utilice para la extracción y purificación del biocombustible y también del país de origen.

El tema del costo es un factor clave en el análisis de la viabilidad de esta industria ya que el negocio no es un simple reflejo de las fuerzas que impone el mercado y como ya mencionamos recibe la influencia de las políticas que establecen los gobiernos para promover su producción, su uso y que se mantienen con el apoyo de los incentivos fiscales.[14]

La rentabilidad de la industria muestra una elevada sensibilidad a los cambios en el precio no solo del petróleo sino también de las materias primas. En el caso de los biocombustibles de primera generación, el propio cultivo contribuye con la mayor fracción en la estructura de costos del negocio. Para el caso del etanol de la caña, el valor puede alcanzar hasta un 60% de los costos totales y en comparación con el biodiesel obtenido a partir de cultivos de soja, este valor puede llegar a un 80%. [15]

La Agencia Internacional de Energía [AIE] ha efectuado una serie de proyecciones en el corto y largo plazo en relación con el posible precio de mercado de los biocombustibles

provenientes de distintas fuentes de materia prima. La situación del mercado varía diametralmente dependiendo del escenario que se asume tomando en cuenta los precios de los combustibles fósiles. [16]

Si se considera un escenario, donde el precio del barril de petróleo se mantiene a un nivel bajo de unos US\$ 50, con la excepción del etanol de caña de Brasil, los restantes biocombustibles de primera generación no podrían competir con la gasolina y la situación para los combustibles como el biodiesel de microalgas de segunda generación se torna todavía menos competitiva.

Sólo considerando un escenario donde se mantengan los precios del barril de petróleo sobre los US\$120 pasaría a ser rentable la producción de los biocombustibles tanto de primera como de segunda generación.

Una estrategia para incrementar la rentabilidad de esta industria es la de utilizar los productos colaterales que se generan en el mismo proceso productivo. El uso de la biomasa residual que permanece luego de la extracción del aceite puede servir como una fuente extra de combustible que ahorraría el consumo de energía que se emplea en la producción del biocombustible. [17]

Otra estrategia para sufragar los altos costos de producción sería el de la venta al sector farmacéutico o el alimenticio de otros productos que pudieran ser cogenerados en el proceso de extracción del aceite.

Rudolph Diesel, el pionero en el desarrollo del motor que lleva su nombre, utilizó el aceite de maní como su primer combustible de prueba pero no pasó mucho tiempo antes que ese combustible vegetal fuera sustituido a escala mundial por nuestro bien conocido óleo de la piedra el que hoy llamamos petróleo.

III. LA TECNOLOGÍA DE MICROALGAS

La tecnología de microalgas ofrece la posibilidad de utilizar el material proveniente de los cultivos como una fuente de energía alternativa al uso de los combustibles fósiles bajo tres enfoques distintos. [18]

El primer enfoque es utilizar las microalgas como una fuente de biomasa para la producción de biogás y es independiente de la especie de alga que se cultive. Mediante el uso de procesos de degradación térmica o los de tipo biológico como la digestión enzimática y la fermentación anaerobia se pueden obtener como productos metano e hidrógeno.

Una variante que es todavía más sencilla es la quema directa del material seco del alga al igual que se usa la leña o el carbón.

Un segundo tipo de enfoque es generar etanol aplicando a la biomasa un proceso combinado de fermentación del homogenizado y la destilación posterior del extracto. Aunque esta estrategia no es despreciable para la cogeneración de combustible en paralelo con la producción de biodiesel, en términos de rendimiento las microalgas no compiten con la

producción de etanol que se obtiene del maíz y de la caña de azúcar.

El tercer enfoque está orientado específicamente hacia la producción de biodiesel para el mercado del parque automotor pesado y también para el uso industrial en centrales termoeléctricas y en sistemas de calefacción entre otros.

Es con este tercer enfoque donde la tecnología de microalgas ofrece una alternativa energética viable capaz de competir con los aceites que provienen de otras fuentes vegetales, sin afectar el nivel de la producción de aceites para el consumo humano.

Al igual que sucede en otros campos de la biotecnología, el éxito del proyecto depende en gran medida de las inversiones en investigación y desarrollo. En el caso de la tecnología de microalgas, la investigación se realiza en varias etapas. [19]

El primer paso es el de reunir un banco con diversas especies y mantenerlas vivas cultivándolas en placas de agar para su clasificación y el estudio de los aspectos relevantes de su bioquímica y su fisiología.

Es relativamente fácil coleccionar cepas de microalgas y poder mantenerlas en cultivo bajo condiciones estériles. Sin embargo, no todas las especies son eficientes para la producción de aceite y de que éste sea apto para producir biodiesel.

Las especies que acumulan altos niveles de aceite lo hacen porque desvían su metabolismo desde las rutas de producción de proteínas y glúcidos hacia las vías metabólicas que producen lípidos lo que en general restringe su crecimiento. Al crecer más lentamente que otras especies sus cultivos son proclives a la contaminación con otras especies no deseadas.

Los triacilgliceroles que componen el aceite le sirven a las microalgas no sólo como un material de reserva energética sino también como un recurso que usa el microorganismo para disminuir su densidad y así poder flotar en estratos superiores más próximos a la fuente de luz, lo que le permite lograr una mayor tasa fotosintética y poder competir con otras especies que no acumulan aceite.

El segundo paso en el esquema es desarrollar un protocolo de escalamiento que permita obtener los niveles de producción que se requieren para que el cultivo sea rentable. [20]

Se ha podido comprobar que los mejores resultados se obtienen cuando se utilizan microalgas que son autóctonas de la zona donde se propagará el cultivo. Sucede con frecuencia que algunas cepas que se comportan como “campeonas” en los cultivos a nivel del laboratorio fallan cuando se prueban en los estudios de campo a una escala mayor.

Para la producción a nivel industrial de microalgas se utilizan dos tipos de sistemas de cultivos: los sistemas abiertos y los cerrados.

Los sistemas abiertos son estanques al aire libre de poca profundidad [50 cm] que utilizan directamente el CO₂ atmosférico y la luz solar. Además disponen de un equipo

rotatorio con paletas que producen un flujo laminar en el sistema mezclando el cultivo sin dañar la suspensión de células. Estos sistemas suelen ser menos costosos que los cerrados en términos de su construcción y operación y tienen una vida útil más larga. [21]

Este tipo de piscinas al aire libre pueden producir en condiciones óptimas una cantidad considerable de microalgas, pero presentan también algunos inconvenientes.

Al ocupar mayores extensiones son también más propensos a la contaminación con otras microalgas foráneas y por bacterias no deseadas. Es por ello que para el cultivo en sistemas abiertos se prefiere el uso de cepas que puedan crecer en unas condiciones extremas que limitan la proliferación de otros organismos tales como valores de pH altos o bajos, temperaturas específicas o requerimientos nutritivos particulares a esa variedad de alga.

En los sistemas abiertos, la tasa de difusión y de disolución del CO₂ en el medio de cultivo puede limitar la tasa del crecimiento celular debido a que la atmósfera contiene relativamente una baja concentración de ese gas.

Otro aspecto que se debe tomar en cuenta es que en los sistemas abiertos no se puede seguir un control estricto de las condiciones ambientales. Al variar factores como la temperatura del entorno y la intensidad lumínica, entre otros, se verá afectada la velocidad de crecimiento del cultivo. [22]

La luz del sol no puede penetrar sino a través de unas pocas pulgadas en el medio de cultivo por el efecto de sombreado entre las células del alga, siendo este un elemento limitante en las granjas de algas con estanques abiertos.

Otro de los parámetros que pueden tornarse críticos en los cultivos de microalgas son los incrementos del pH del medio. Las microalgas por efecto de la fotosíntesis alcalinizan el medio hasta niveles que no pueden ser compensados por el efecto neutralizador que genera la captura del CO₂ y la tasa respiratoria de las mismas microalgas por lo que es imprescindible mantener un control riguroso del pH en el medio de cultivo. [23]

De ahí que se prefiera en algunos casos mantener un consorcio microbiano controlado donde las microalgas crezcan junto con ciertas bacterias, en lugar de un cultivo puro [del tipo axénico] con solo microalgas. Las bacterias al respirar acidifican el medio y colaboran para compensar el desbalance del pH.

El otro tipo de cultivo son los sistemas cerrados que emplean tanques con agitación por burbujeo de CO₂ y fuente de luz natural y/o artificial, Por su tipo de diseño estos reactores permiten llevar a cabo un control más eficiente de las condiciones del cultivo ajustando los parámetros óptimos de crecimiento. [24]

Los sistemas cerrados como los fotobioreactores aunque son más costosos previenen la evaporación del agua y reducen las pérdidas del CO₂ que usualmente se suministra partiendo de fuentes externas de gas industrial, a esto se suma una

probabilidad menor de que el sistema se contamine y el pudiendo mantener constantes otras condiciones como la temperatura del cultivo.

Uno de los aspectos que determinan la eficiencia final de todo proceso para obtener el biodiesel es el de asegurar que la recolección de la biomasa de microalgas se logre en un tiempo corto y con el mayor rendimiento que sea posible.

Para lograr este propósito se aplica un procedimiento que sigue varias etapas de separación y purificación de la biomasa. Entre las alternativas disponibles para la separación de la biomasa están las técnicas de flotación, floculación y espesamiento del material y que prosigue con la filtración o cribado de la pasta y su precipitación por gravedad o por centrifugación a bajas revoluciones y en algunos casos aplicando en las últimas etapas técnicas de electroforesis.[25]

La combinación óptima de técnicas de extracción de la biomasa que se aplicará al cultivo se evaluará no solo por la eficiencia intrínseca de los métodos y el tiempo empleado sino también por el costo de la tecnología utilizada. La técnica más apropiada para efectuar la cosecha va a depender de las características físicas de las microalgas, de su tamaño y densidad y por supuesto de la rentabilidad que viene también en función del valor de los productos que se obtendrán al final del proceso.

Una vez que se ha aislado la biomasa del alga, ésta se debe secar con rapidez por ser un producto perecedero. Aunque el secado al sol es el método de menor costo se requieren tiempos prolongados de exposición lo que pudiera afectar la estabilidad del material, existen otros procedimientos más rápidos y eficientes que se pueden aplicar como el secado en tambor, la técnica del lecho fluido o la liofilización. [26]

La pasta de alga una vez seca se somete a un proceso de extracción que comienza con la lisis celular con homogeneizadores de alta presión seguido de la extracción con solvente de los ácidos grasos utilizando hexano, cloroformo, etanol y otros.

Los aceites que provienen de las microalgas al igual que la mayoría de los aceites vegetales presentan un inconveniente que es su elevada viscosidad lo que prácticamente imposibilita su uso directo como combustibles. La alta viscosidad se debe a la estructura molecular del aceite que en términos químicos es un triéster que une cadenas de ácidos grasos a una molécula de glicerol. [27]

Una forma de resolver el problema de la viscosidad es modificar el aceite mediante una reacción de transesterificación que disocia las cadenas de los ácidos grasos acoplándolos a una molécula de alcohol de bajo peso molecular como el metanol. Este proceso tiene la ventaja de que no forma emulsiones como ocurriría con una reacción de saponificación que al formar jabones anularía la posibilidad de utilizar el producto como un combustible para motores. [28]

Una parte considerable del esfuerzo proveniente de la investigación básica se ha centrado en el estudio del efecto que genera la limitación de la concentración de ciertos nutrientes como el N y el Si en los medios de cultivo.

Con la depleción de estos elementos, se ha demostrado en experimentos a pequeña escala, que se puede potenciar la acumulación del aceite [biodiesel] en varias especies de microalgas. [29]

No obstante, los resultados al final no han sido del todo favorables ya que se comprobó que ocurría una disminución importante en la tasa de crecimiento de las microalgas y que ésta anulaba el efecto potenciador de la depleción de los nutrientes en los niveles de los lípidos del alga.

Un enfoque relativamente reciente es la posibilidad de modificar los genes de las microalgas para que expresen en un mayor nivel ciertas enzimas como la Acetil CoA Carboxilasa cuya estimulación conduce hacia una mayor producción de aceite. [30]

En las plantas, la enzima ADP glucosa pirofosforilasa, cumple un papel central en la formación del almidón y se ha podido obtener cepas mutantes de algas que no expresan esta enzima logrando a su vez un incremento en el contenido de los lípidos totales.

Mediante técnicas de manipulación genética se ha podido interferir en la expresión de varias enzimas reductoras que actúan sobre el metabolismo de lípidos incrementando los niveles intracelulares de aceite en el alga sin afectar su crecimiento.

Algunas empresas biotecnológicas han realizado importantes desarrollos en el campo del cultivo de microalgas para reducir los costos e incrementar el rendimiento de extracción de los biocombustibles.

Diversified Technologies utiliza la tecnología de campos eléctricos pulsantes [PEF por sus siglas en inglés] para reducir los costos de la extracción del aceite. El campo eléctrico aplicado en pulsos de alto voltaje mediante una cámara de electroporación genera agujeros en la pared celular de las microalgas permitiendo que el contenido intracelular difunda al medio circundante para su posterior purificación [31].

En comparación con las tecnologías clásicas que aplican etapas convencionales de secado y de extracción con solventes, el costo del PEF es considerablemente menor con un valor de US\$ 0.10 por galón de biocombustible frente a los US\$ 1.75 por galón que se gastan con las tecnologías anteriores. La diferencia radica en que se puede omitir la etapa de secado del material que representa muchas veces hasta un 75% del costo del proceso total de extracción del aceite.[12]

La empresa biotecnológica Originoil investiga con un método novedoso al que denominan fotobiorreactor de hélice. Este sistema emplea luces de bajo consumo de energía colocadas siguiendo un patrón helicoidal que rodea los tubos del reactor

y donde las células del cultivo reciben la cantidad de luz que necesita con un mínimo efecto de sombreo.

Cada foco de iluminación en el biorreactor emite luz en longitudes de onda específicas para la fotosíntesis lo que incrementa la tasa de crecimiento del cultivo.

Este tipo de biorreactor también resuelve otro problema clave en el crecimiento de células de algas; la incorporación continua del CO₂ y de los nutrientes al reactor sin tener que interrumpir el flujo.

Originoil emplea la fractura cuántica que es otro tipo de tecnología de punta en el sector de la industria de las microalgas. En una etapa previa a su inyección se comprimen el gas y los nutrientes a presiones muy altas de forma que al incorporarse al cultivo a presión atmosférica se producen micro burbujas en el medio. Este efecto aumenta la eficiencia del proceso de absorción y al mismo tiempo garantiza la integridad de las células.[32]

IV. VENTAJAS QUE OFRECEN LOS CULTIVOS DE MICROALGAS

Una de las principales ventajas que ofrecen los cultivos de microalgas proviene de su balance positivo en el uso del anhídrido carbónico que absorben de la atmósfera. Igual que sucede con todas las plantas, al mismo tiempo que producen CO₂ con la respiración lo incorporan de nuevo mediante la fotosíntesis para producir materia orgánica. Como la tasa de fotosíntesis en las microalgas supera a la respiratoria fijan más CO₂ que el que producen sus células con una ganancia neta de oxígeno que luego difunde a la atmósfera.

Además, como no todo el CO₂ que fija el alga pasa a formar aceite, existe una fracción que deriva hacia otros componentes hidrocarbonados que permanecen en la biomasa residual y que actúa como un sumidero adicional de carbono.

Así el proceso de captura y emisión del gas da un balance neto positivo permitiendo que se fije un excedente del CO₂ proveniente de la atmósfera contribuyendo con la disminución del efecto invernadero en el planeta. [33]

Otro aspecto que se debe tomar en cuenta en relación con el balance de carbono, es que algunas especies de algas, además de acumular aceites producen cantidades considerables de carbohidratos en sus células.

Una vez que se extrae el aceite, la biomasa residual puede ser tratada con enzimas y sometida a un proceso de fermentación aeróbica para producir etanol que aporta un segundo biocombustible a partir de un mismo cultivo.

El etanol se puede ofrecer en el mercado como un aditivo para la gasolina y de forma indirecta disminuir los costos de la producción del biodiesel o se puede usar como estrategia de cogeneración para que aporte la energía que se necesita para el funcionamiento del mismo proceso.

El biodiesel que se extrae de las microalgas es biodegradable y es menos dañino en otros aspectos que los combustibles fósiles. El nivel de material particulado, como el

hollín que se produce en su combustión es considerablemente inferior y es menos carcinogénico. Adicionalmente, el nivel de azufre que contiene el biodiesel es menor al de los combustibles que provienen del petróleo, lo que incide positivamente en la reducción del problema de las lluvias ácidas. [34]

En adición a su contribución con la reducción de los niveles de CO₂ en la atmósfera, las microalgas son notablemente eficientes también en otros aspectos. Al igual que sucede con otros microorganismos, ellas se multiplican de forma exponencial a una tasa que alcanza un máximo de crecimiento en unas 4 horas, obteniéndose un rápido incremento en la masa celular en un período de sólo 24 horas de cultivo, superando la tasa de crecimiento de las plantas terrestres.

Estos organismos proliferan como células aisladas o en agrupaciones de pocos individuos y esto les permite transformar la energía solar en compuestos orgánicos con una eficiencia mucho mayor a los cultivos de las plantas superiores.

El hecho de crecer como suspensiones acuosas les garantiza el suministro de radiación lumínica a todos los individuos siempre y cuando la agitación sea adecuada. Además les brinda un acceso prácticamente directo al agua del medio, al CO₂ disuelto y a los otros elementos nutritivos que le son esenciales para su crecimiento, tales como, el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y el magnesio. [35]

Si no se presenta ningún otro tipo de limitaciones en las condiciones del cultivo [nutrientes, temperatura, suministro de CO₂] la eficiencia y la cinética de la fotosíntesis viene dada directamente en función de la calidad e intensidad de la radiación lumínica que incide sobre el cultivo.

En comparación con las plantas superiores que realizan la fotosíntesis con una eficiencia promedio del 2%, las microalgas, debido a que poseen una estructura simple y mantienen un bajo consumo energético, alcanzan una eficiencia fotosintética superior. Existen especies que en función de las condiciones de cultivo pueden alcanzar una eficiencia de hasta un 8%. [17]

Además, las microalgas ofrecen otras ventajas adicionales, pueden ser cosechadas siguiendo un régimen prácticamente continuo en contraste con los cultivos tradicionales terrestres que permiten solo cosechas anuales o bianuales y no requieren del uso de pesticidas y herbicidas.

Las microalgas requieren de un consumo menor de agua si se le compara con otros cultivos tradicionales como el maíz y la caña de azúcar. En el caso de los cultivos de algas, a menos que se presente algún tipo de contaminación particular, el medio de cultivo se puede reciclar compensando la pérdida de nutrientes absorbidos añadiendo una cierta proporción de medio fresco.

Las técnicas que comúnmente se utilizan para extraer del cultivo la biomasa de algas, tales como, el cribado, la filtración y la centrifugación en tambor a bajas revoluciones no descartan la totalidad del material celular del medio,

permitiendo que las células que permanecen en el percolado y en el sobrenadante actúen como semillas para seguir un nuevo ciclo.

Algunas especies se comportan como heterótrofos facultativos y pueden crecer tanto en presencia como ausencia de luz siendo capaces de nutrirse metabolizando sustratos orgánicos que captan directamente del medio de cultivo. Esta propiedad les confiere otra ventaja adicional y es que pueden crecer muy bien en aguas residuales tanto residenciales como de origen industrial. [36]

Este tipo de aguas de desecho no sólo aporta los nutrientes que el alga requiere como el nitrógeno y el fósforo sino que además constituye un recurso para la purificación de efluentes que en principio no serían aptos para el riego directo de cultivos agrícolas ni para el consumo animal y humano.

El tratamiento de esos efluentes actúa al evitar que ocurran problemas posteriores por efectos eutróficos en áreas sensibles a ese tipo de perturbación en ciertos tipos de ecosistemas.

La literatura es pródiga en reportes sobre el uso de la tecnología de microalgas para el tratamiento de efluentes provenientes de diversas fuentes como la industria pesquera, de productos cárnicos de aves, porcinos, ganado vacuno y de la industria vinícola. [37]

Por ser organismos unicelulares, su biomasa entera posee los compuestos de interés comercial, a diferencia de las plantas superiores en las que los productos recuperables se encuentran en sitios u órganos específicos, lo que dificulta su extracción y una cantidad considerable del material se pierde como desecho. Ciertas especies de microalgas pueden llegar a producir un rendimiento de aceite para uso como biodiesel que alcanza valores de hasta un 70% del peso seco del alga. Las producciones anuales de aceites a base de microalgas son mucho mayores, hasta 500 veces superiores que para cualquier otro tipo de cultivo.

Actúan también como agentes biodetectores y bioremediadores, logrando de forma eficaz la remoción de metales pesados a partir de efluentes industriales con un alto nivel de contaminación como es el caso, de *Chlorella* y *Scenedesmus*, que son capaces de eliminar de la solución acuosa niveles importantes de metales tóxicos como el cadmio, cromo, mercurio y plomo.

Ciertos metales pesados inducen cambios genéticos en las microalgas por efecto de mutación. Sin embargo existen especies que en lugar de intoxicarse se vuelven tolerantes y acumulan el metal. El mecanismo de detoxificación al parecer es específico y depende del tipo de alga y del metal. El Zinc y el Cadmio se acumulan en general en las vacuolas, pero otros metales se fijan a los exoesqueletos y también en otros organelos subcelulares. [38]

La versatilidad que demuestran las microalgas para poder crecer en diversos ambientes y en condiciones que le son adversas a otros organismos se debe en gran medida a su capacidad para sintetizar compuestos que poseen ciertas propiedades especiales y que les protegen de condiciones

medioambientales extremas, como en el caso, de una intensa radiación solar [betacaroteno], del impacto osmótico cuando proliferan en soluciones hipersalinas [glicerol] o incluso si le otorgan ventajas competitivas frente a otras variedades de algas por el acceso a la luz [aceites]. [39]

Las microalgas como es el caso de la *Spirulina* que se ofrece comercialmente aportan proteínas de alta calidad nutricional aptas para el consumo humano lo que podría reducir el consumo de carne de vaca ahorrando para la agricultura amplias extensiones de tierras de pastoreo y recordemos además que por ser rumiantes contaminan el aire con sus “emanaciones” de gas metano, otro contribuyente importante al efecto invernadero. [40]

Por otro lado, en el campo de la zootecnia se viene trabajando desde hace tiempo con algunas especies de microalgas que sirven de alimento para cultivar el zooplancton que se usa para la cría de camarones y para la piscicultura.

Otro ejemplo es el caso de la *Dunaliella* salina que es la principal fuente de betacaroteno para la industria farmacéutica. Este pigmento es un excelente fotoprotector para la piel y un antioxidante eficaz que protege al organismo contra los radicales libres y además actúa como precursor de la vitamina A. [41]

En términos de la economía del sistema de cultivo de microalgas resulta conveniente considerar otras estrategias de producción basadas en un concepto integral de biorefinería, donde la biomasa además de ser una fuente de biodiesel provea otros productos comercializables tales como: alimento para el ganado, compuestos de valor farmacéutico como vitaminas y antibióticos y otros biocombustibles adicionales como el etanol y el biogás. [42]

Otros tipos de enfoques se vienen desarrollando para sustituir a los combustibles fósiles en el sector del transporte. Sin embargo, opciones como los vehículos eléctricos no constituyen por el momento una alternativa válida para la sustitución por el alto costo de adquisición del vehículo y su reducida autonomía por limitaciones en el número de las fuentes de recarga y los tiempos prolongados de conexión. [43]

El uso de las celdas solares en el sector del transporte no constituye una opción competitiva y como prueba un ejemplo. El Solar Impulse 2 es una aeronave experimental propulsada exclusivamente por paneles de energía fotovoltaica. Utilizando este tipo de tecnología limpia el avión hace la travesía transoceánica entre New York y Madrid sin escalas, pero tarda en hacer el viaje 70 horas. [44]

V. CONCLUSIONES

El uso de las celdas solares en el sector del transporte no constituye una opción competitiva y como prueba un ejemplo. El Solar Impulse 2 es una aeronave experimental propulsada exclusivamente por paneles de energía fotovoltaica. Utilizando este tipo de tecnología limpia el avión hace la travesía transoceánica entre New York y Madrid sin escalas, pero tarda en hacer el viaje 70 horas. [44]

En el trabajo presentamos una serie de evidencias y de criterios que apoyan la viabilidad del uso del biocombustible de microalgas como una alternativa para sustituir al menos parcialmente a los combustibles fósiles.

El biodiesel de microalgas cumple con una serie de criterios de sostenibilidad ambiental: genera un balance positivo en la reducción de los gases de efecto invernadero, preserva la biodiversidad de los ecosistemas, mantiene la integridad de los sumideros naturales de carbono ya que no requiere del uso de la tierra virgen de los bosques, humedales y turberas, reduce la práctica común y perjudicial de la quema para adecuar el terreno para la siembra, y cumple también con un objetivo de sostenibilidad social como es el de crear puestos de trabajo para un personal poco calificado algo que es valioso en particular para los países en desarrollo

A pesar de sus ventajas, la tecnología microalgal también presenta algunas limitaciones, entre las más relevantes se cuentan: la dificultad para mantener en sistemas abiertos monocultivos de algas sin que se contaminen y que al mismo tiempo produzcan un alto rendimiento de biomasa y la dificultad para obtener especies de microalgas oleaginosas que se adapten con facilidad a distintos ambientes.

El elevado consumo de energía que involucran los procesos de bombeo, transferencia de gases, mezclado, recolección y sobretodo la deshidratación de la biomasa de microalgas, se reflejan tanto de forma directa como indirecta en los costos de producción que en general superan con creces el costo de extracción y refinación de los combustibles fósiles.

No obstante, los costos de producción del biocombustible de microalgas se pueden reducir aplicando diversas estrategias entre las que se deben incluir: los nuevos avances en la tecnología de los fotobioreactores, la disminución de los costos para la recolección de la biomasa, el uso de reacciones de transesterificación que no requieran de etapas previas de deshidratación del material, la recuperación del recurso hídrico a partir de las aguas residuales.

Por otra parte, se dispone de la tecnología para modificar las propiedades metabólicas de las microalgas mediante la ingeniería genética a fin de mejorar la productividad, incrementar la concentración de aceite en las células y controlar procesos como la fotoinhibición y la fotooxidación que reducen la tasa efectiva de fotosíntesis del alga.

REFERENCIAS

[1] Burlew J. [1953]. *Algal culture from laboratory to pilot plant*. Carnegie Institution of Washington, Washington DC, 357

[2] Slade R. y Bauen A. [2013]. Microalgae cultivation for biofuels: cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. *Biomass and bioenergy* 53 : 29-38

[3] Mann G., Schlegel R., Schumann G. y Sakalauska A. [2009]. Biogas-conditioning with microalgae. *Agronomy Research* 7[1]: 33-38.

[4] Weissman J. y Tillet, D. [1989]. *Design and operation of an outdoor microalgae test facility. Aquatic Species Program. Annual report*. Bollmeier WS, Sprague S [eds.] Solar Energy research Institute golden Soeder C. [1986]. *An historical outline of applied algology*. In

Richmond A [ed.], *Handbook of Microalgal Mass Culture*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 25-41

[5] Soeder C. [1986]. *An historical outline of applied algology*. In Richmond A [ed.], *Handbook of Microalgal Mass Culture*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 25-41

[6] Chisti Y. [2007]. *Biodiesel from microalgae*. *Biotechnology Advances* 25: 294–306

[7] Ben-Amotz A., Tornabene T. y Thomas W. [1985]. Chemical profile of selected species of microalgae with emphasis on lipids. *J. Phycol.* 21: 72-81.

[8] Fischer C., Klein-Marcuschamer D. y Stephanopoulos G. [2008]. *Selection and optimization of microbial hosts for biofuels production*. *Metab. Eng.* 10: 295-304.

[9] Gao Y , Gregor C. , Liang Y. , Tang D. y Tweed C. [2012]. *Algae biodiesel a feasibility report*. *Chemistry Central Journal* 6 [Suppl 1] : S1

[10] Hernández-Pérez A. y Labbé J. [2014]. *Microalgas, cultivo y beneficios*. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* Vol. 49, Nº2: 157-173.

[11] Chakravorty U., Hubett M., Nøstbakken L. [2009]. *Fuel versus food*. *Annu. Rev. Resour. Econ.* 1: 645-663.

[12] FAO [2008]. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*.

[13] CEPAL [2008]. Comisión Económica para América Latina y el Caribe *Biocombustibles líquidos para transporte en América Latina y el Caribe*

[14] Williams P. [2007]. Biofuel: microalgae cut the social and ecological costs. *Nature*, 450: 478

[15] CEPAL [2011]. Comisión Económica para América Latina y el Caribe Estudio regional sobre la economía de los biocombustibles en 2010: temas clave para los países de América Latina y el Caribe

[16] International Energy Agency [2011]. *Annual Report 2010. Algal Biofuels Status and Prospects* IEA Bioenergy Task 39

[17] Ación F. , Fernández J. , Magán J. y Molina E. [2012]. *Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it*. *Biotechnology Advances* 30: 1344-1353

[18] Chaumont D. [1993]. Biotechnology of algal biomass production: a review of systems for outdoor mass culture. *Journal of Applied Phycology* 5: 593-604,

[19] Brennan L. y Owende P. [2010] Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 557–577

[20] Deng X, Li Y. y Fei X. [2009]. *Microalgae: A promising feedstock for biodiesel* African Journal of Microbiology Research 3: 1008-1014

[21] Garibay A. , Vázquez R. , Sánchez M., Serrano L. , y Martínez A. [2009]. *Biodiesel a Partir de Microalgas*. *BioTecnología*, Vol. 13 No. 3

[22] Borowitzka M. [1999]. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of Biotechnology* 70: 313-332

[23] Berenguel M., Rodríguez G. , Ación M. y García J. [2004]. *Model predictive control of pH in tubular photobioreactors*. *Journal of Process Control* 14: 377-387

[24] Laws E. , Taguchi S., Hirata J., Pang L. [1988]. *Mass culture optimization studies with four marine microalgae*. *Biomass* 16: 19-32.

[25] Richmond A. [1992]. Open systems for the mass production of photoautotrophic microalgae outdoors: physiological principles. *J. appl. Phycol.* 4: 281-286.

[26] Terry K. y Raymond L. [1985]. *System design for the autotrophic production of microalgae*. *Enzyme Microb. Technol.* 7: 474-487.

[27] Stephenson A., Kazamia E., Dennis J., Howe, C., Scott, S. y Smith, A. [2010]. Life-cycle assessment of potential algal biodiesel production in the United Kingdom: A Comparison of raceways and air-lift tubular bioreactors. *Energy Fuels*, 24 [7]: 4062–4077.

[28] Liu B. y Zhao Z. [2007]. Biodiesel production by direct methanolysis of oleaginous microbial biomass. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 82: 775-780.

- [29] Ho S. , Chen C. y Chang J. [2012]. Effect of light intensity and nitrogen starvation on CO₂ fixation and lipid/ carbohydrate production of an indigenous microalga *Scenedesmus obliquus* CNW-N. *Bioresource Technology* 113: 244-252
- [30] Parker M. , Mock T., Armbrust E. [2008]. *Genomic insights into marine microalgae*. *Annu. Rev. Genet.* 42: 619-645.
- [31] Diversified Technologies, Inc. Company Profile . Disponible en: <http://www.divtecs.com/company-profile/> . Consultado en septiembre 2016
- [32] OriginOil Inc . Directory: OriginOil. Disponible en: <http://peswiki.com/directory:originoil> Consultado en septiembre de 2016
- [33] González-López C. , Acién F. , Fernández-Sevilla J. y Molina E. [2011]. *Uso de microalgas como alternativa a las tecnologías disponibles de mitigación de emisiones antropogénicas de CO₂*. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental Algal* 2[2]: 93-106.
- [34] Zeng X., Danquah M., Dong-Chen X. y Lu Y. [2011]. *Microalgae bioengineering: From CO₂ fixation to biofuel production*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 3252-3260.
- [35] Schenk P. , Thomas-Hall S. , Stephens E., Marx U. , Mussgnug J., Posten C., Kruse O. y Hankamer B. [2008]. *Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production*. *Bioenerg. Res.* 1: 20-43.
- [36] Chiu S. , Kao C., Huang T., Lin C. , Ong S. , Chen C. , Chang J. y Lin C. [2011]. Microalgal biomass production and on-site bioremediation of carbon dioxide, nitrogen oxide and sulfur dioxide from flue gas using *Chlorella* sp. cultures. *Bioresource Technology* 102: 91359142.
- [37] Park J. , Craggs R. y Shilton A. [2011]. *Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production*. *Bioresource Technology* 102: 35-42.
- [38] Peña-Castro J. , Martínez-Jerónimo F. , Esparza-García F. y Cañizares-Villanueva R. [2004]. *Heavy metals removal by the microalga Scenedesmus incassatus in continuous cultures*. *Bioresource Technology* 94: 219-22
- [39] Harun R., Singh M., Forde G. y Danquah M. [2010]. *Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 1037-1047.
- [40] Richmond A., Lichtenberg E., Stahl B. y Vonshak A. [1990]. Quantitative assessment of the major limitations on productivity of *spirulina platensis* in open raceways. *Journal of Applied Phycology* 2: 195-206
- [41] Spolaore P., Joannis-Cassan C., Duran E. y Isambert A. [2006]. *Commercial Applications of Microalgae*. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 101[2]: 87-96
- [42] Wijffles R. y Barbosa, M. [2010]. *Perspective: An outlook on microalgal biofuels*. *Science*: 329: 796 – 799
- [43] Freyssenet M. [2011]. *Lo más dudoso no es lo más improbable, el coche eléctrico. La nueva revolución del automóvil*. *Jornada internacional. Movilidad sostenible y el vehículo eléctrico , el motor de la innovación*.
- [44] BBC NEW. Science & Environment . [2016] *Solar Impulse completes historic round-the-world trip*. Disponible en: <http://www.bbc.com/news/scienceenvironment-36890563>. Consultado en junio 2017



Los fotobiorreactores de microalgas: Un recurso para el tratamiento terciario de aguas residuales

Rafael Muñiz
rmuniz53@gmail.com

Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería, Universidad Católica Andrés Bello. Caracas,
Venezuela

Historia del Artículo

Recibido: 22 de abril de 2019

Aceptado: 10 de julio de 2019

Disponible online: 12 de julio de 2019

Resumen: Las microalgas son organismos fotosintéticos y se encuentran en la naturaleza con una amplia diversidad de taxonomías. Se han reportado múltiples aplicaciones industriales que parten de una serie de avances en el desarrollo del campo de la biotecnología de estos organismos. Estos desarrollos comprenden desde la producción de biocombustibles, abonos, complementos para la alimentación humana y de los animales de cría hasta el aporte de insumos para la industria farmacéutica. Una de las aplicaciones mejor documentadas de estos cultivos es su uso para el tratamiento de aguas residuales en las etapas finales del proceso de purificación. El cultivo de las microalgas a nivel industrial, presenta una serie de dificultades por el elevado costo del proceso y la inestabilidad de los cultivos debido a las condiciones variables del entorno y a la contaminación del medio nutritivo con otros microorganismos. Una alternativa para poder sortear algunos de estos problemas es el uso de fotobiorreactores. Un fotobiorreactor es un dispositivo cerrado diseñado para producir microorganismos fotosintéticos con un elevado rendimiento de biomasa siempre que se cumplan los requerimientos óptimos. El crecimiento de las algas en un fotobiorreactor reduce el riesgo de contaminación, mejora la reproducibilidad en las condiciones de cultivo, brinda un mayor control de las condiciones hidrodinámicas y de la temperatura, además de permitir un diseño técnico apropiado. Los avances tecnológicos en el diseño de estos sistemas han permitido mejorar notablemente la productividad y por ende la economía de los cultivos para distintos fines. Este artículo plantea como objetivo presentar de manera crítica información sobre los distintos diseños de fotobiorreactores, así como de los factores que afectan el cultivo de las microalgas en este tipo de dispositivos y se enfocará en el tratamiento terciario de aguas residuales. A partir de la información recopilada en este trabajo podemos sugerir el uso de estos dispositivos y en particular los que se construyen a pequeña escala como un recurso para reducir la contaminación de las aguas residuales provenientes de fuentes industriales y de origen urbano.

Palabras clave: microalgas, fotobiorreactores, aguas residual.

Microalgal photobioreactors: A resource for the tertiary treatment of wastewater

Abstract: The microalgae are photosynthetic organisms and are found in nature with a wide diversity of taxonomies. Multiple industrial applications have been reported that start from a series of advances in the development of the biotechnology field of these organisms. These developments range from the production of biofuels, fertilizers, supplements for human and animal feed to the contribution of supplies for the pharmaceutical industry. One of the best documented applications of these crops is their use for the treatment of wastewater in the final stages of the purification process. The cultivation of microalgae at an industrial level presents a series of difficulties due to the high cost of the process and the instability of the crops due to the variable environmental conditions and the contamination of the nutrient medium with other microorganisms. An alternative to overcome some of these problems is the use of photobioreactors. A photobioreactor is a closed device designed to produce photosynthetic microorganisms with a high biomass yield as long as the optimal requirements are met. The growth of algae in a photobioreactor reduces the risk of contamination, improves reproducibility in crop conditions, provides greater control of hydrodynamic conditions and temperature, in addition to allowing an appropriate technical design. The technological advances in the design of these systems have allowed to improve notably the productivity and therefore the economy of the crops for different purposes. This article aims to present critically information on the different designs of photobioreactors, as well as the factors that affect the cultivation of microalgae in this type of devices and will focus on the tertiary treatment of wastewater. From the information gathered in this work we can suggest the use of these devices and in particular those that are built on a small scale as a resource to reduce the pollution of wastewater from industrial sources and urban origin.

Keywords: microalgae, photobioreactors, wastewater

I. INTRODUCCIÓN

Las algas desempeñan un papel fundamental a nivel ambiental fijando hasta un 40% del carbono atmosférico y aportando a su vez una fracción importante del oxígeno a la biosfera. Debido a su abundancia, su copiosa biodiversidad y su habilidad para poder sobrevivir en una variedad de ambientes que incluyen condiciones extremas, estos organismos cumplen con una función relevante en la ecología de nuestro planeta.

Por otro lado, las algas son un recurso muy valioso desde el punto de vista de la economía, sirviendo como fuente de materia prima de una serie de sustancias de interés comercial, e

inclusive logran utilizar los residuos de procesos industriales y los desechos urbanos y rurales como fuentes de alimento para su crecimiento [1].

Las microalgas constituyen un grupo muy extenso y diverso de microorganismos fotosintéticos, poseen una estructura simple lo que les permite lograr un rápido crecimiento y por ende generar una mayor biomasa, con la ventaja sobre otros tipos de biotecnologías de que no compiten con las áreas de los cultivos tradicionales y según su especie pueden crecer tanto en agua dulce como salada.

La composición de la biomasa es uno de los criterios que se toman en cuenta para clasificarlas según la especie, en conjunto con

otros aspectos como su morfología y el tipo de hábitat donde viven.

Estos microorganismos son capaces de producir una amplia gama de compuestos: biocombustibles, abonos orgánicos, proteínas de buen grado de palatabilidad para el ser humano y los animales de cría, antibióticos, pigmentos, esteroides entre otros, empleando en su síntesis únicamente la luz solar, el dióxido de carbono, una fuente que aporte N y P, en presencia de algunas sales inorgánicas. La biotecnología de microalgas ha ganado preponderancia en las últimas décadas conduciendo a los investigadores al desarrollo de una serie de bioprocesos que la vinculan con necesidades específicas de la población.

Como se discutirá con mayor detalle en los párrafos siguientes, para el cultivo de microalgas se emplean dos tipos de tecnologías: los sistemas abiertos en los que el cultivo se encuentra expuesto directamente al entorno y los sistemas cerrados que incluyen a los fotobiorreactores (FBR) en los que el cultivo tiene poco o ningún contacto con la atmósfera [2].

Se considera que “ el estado del arte ” de los sistemas abiertos llegó en el presente siglo a un techo tecnológico, por lo que el éxito de este tipo de biotecnología en el futuro dependerá en una buena medida del desarrollo de los dispositivos de tipo cerrado con el propósito de incrementar la biomasa y diversificar el número de compuestos útiles que se pueden obtener a partir de los cultivos [3].

Un fotobiorreactor es un dispositivo cerrado diseñado para producir microorganismos fotosintéticos bajo condiciones controladas donde se ajustan una serie de parámetros como los requerimientos óptimos de luz y la eficiencia en el mezclado, garantizando una buena transferencia de masa y de calor en el sistema y aislándolo del ambiente externo lo que previene la contaminación con organismos foráneos [4].

Tomando en cuenta los factores económicos, los FBR en el presente son muy apreciados, no solo por su alta producción de biomasa sino también por su menor costo cuando se les compara con los sistemas abiertos [5].

Este artículo tiene como objetivos plantear al lector los aspectos fundamentales de la tecnología de microalgas, con sus bondades y limitaciones, describir los factores fisicoquímicos y biológicos que pueden afectar la productividad de los cultivos y establecer los principales criterios que se deben tomar en cuenta para lograr que los fotobiorreactores sean eficientes para ser utilizados en una serie de aplicaciones generales de la biotecnología de microalgas y en particular como un recurso para el tratamiento terciario de aguas residuales.

Entre los objetivos principales del presente trabajo de investigación documental se incluyen los siguientes aspectos:

- ¿Qué tipo de factores de tipo físico, químico y biológico determinan el crecimiento óptimo de las microalgas bajo condiciones confinadas?

- ¿Cuáles son las principales ventajas y también las desventajas del uso de biorreactores de microalgas para el tratamiento de las aguas residuales en comparación con los sistemas abiertos?
- Presentar algunas aplicaciones de los biorreactores de microalgas en el tratamiento terciario de aguas residuales industriales y domésticas

II. APLICACIÓN DE LAS MICROALGAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El agua dulce es imprescindible para conservar la vida en el planeta y se ha convertido hoy en un recurso que es escaso en muchos países. Esto sucede en particular en las regiones más pobres y subdesarrolladas del planeta donde las aguas residuales se vienen utilizando cada vez con mayor frecuencia y en mayor cantidad para uso en la agricultura. Aunque en principio, esto podría generar beneficios para la economía agrícola, su uso indiscriminado sin tomar en cuenta otras consideraciones, podría ocasionar problemas para la salud tanto en humanos como en los animales de cría.

Según menciona la Organización Mundial de la Salud, hay una serie de enfermedades como el cólera, la diarrea, la fiebre tifoidea y otras fiebres entéricas que son transmitidas como consecuencia directa o indirecta por el mal manejo de las aguas residuales provenientes de fuentes industriales y de origen doméstico [6].

Tomando en cuenta todo el riesgo para la salud que involucra esta posible fuente de contaminación ha surgido la necesidad de desarrollar nuevos procesos que permitan el tratamiento de las aguas residuales y que a su vez estas tecnologías sean eficientes y de bajo costo con el propósito de hacer viable su implementación, en particular en aquellas locaciones donde los recursos económicos son muy limitados [7].

El tratamiento convencional de aguas residuales se realiza básicamente en tres etapas y la complejidad que sigue el proceso depende del tipo de agua residual que se esté tratando y de los costos que se generan durante el curso de su purificación.

En rasgos generales, el proceso se inicia con una etapa preliminar donde se remueven los sólidos de gran tamaño. Esta etapa previa se realiza haciendo pasar el caudal a través de una serie de barras metálicas que actúan como un cribado, reduciendo la velocidad de flujo y permitiendo así que ocurra la retención de los sólidos suspendidos [8].

El siguiente paso, que se denomina etapa primaria, busca separar los sólidos de menor tamaño que se puedan sedimentar. Esta etapa se realiza en tanques en los que permanece el agua confinada por un tiempo permitiendo la segregación del fluido y que se separen los materiales particulados según su densidad.

La etapa secundaria del tratamiento tiene como propósito el de disminuir la DBO y la DQO (demandas biológicas y químicas de oxígeno) reduciendo así los niveles de materia orgánica

en las aguas servidas. Esta etapa implica incubar el material que se quiere purificar bajo condiciones aerobias y/o anaerobias en presencia de consorcios microbianos constituidos por algas y bacterias que son capaces de metabolizar los compuestos orgánicos.

La etapa terciaria se enfoca fundamentalmente en reducir a un mínimo los niveles remanentes de compuestos orgánicos solubles y las sustancias que provienen de su metabolismo durante el proceso previo de digestión. Dependiendo del tipo de compuestos se les puede reducir sea por medios químicos o mediante otros tratamientos biológicos adicionales. La remediación química es por lo general más costosa e involucra una fuente de contaminación secundaria por lo cual se prefiere la remediación biológica.

Cuando se comparan los costos operativos a lo largo del proceso de purificación se comprueba que la etapa terciaria, diseñada en un principio para remover el exceso de iones amonio, nitratos y fosfatos es cuatro veces más costosa que la etapa primaria y en el caso de que se requiera incluir una cuarta etapa de tratamiento para remover los metales pesados y otros compuestos tóxicos el costo adicional se incrementaría de 6 a 8 veces en relación con las primeras etapas [9].

Es en las etapas finales del proceso de depuración donde los cultivos de microalgas ofrecen su mayor potencial para purificar aguas residuales, en especial a nivel terciario, debido a la capacidad de las microalgas para fijar

elementos como el N y el P con una elevada eficiencia previniendo así que ocurran fenómenos ulteriores de eutrofización de las fuentes de acuíferos con todos los problemas que acompañan a este fenómeno.

Se conocen ciertas especies de microalgas que son capaces de acumular y tolerar cantidades importantes de metales pesados por lo que no se debe descartar también su aplicación en una fase cuaternaria del tratamiento de aguas.

A lo largo de décadas los esfuerzos en I & D realizados en diversos países, entre los que hay que destacar como pioneros a los Estados Unidos de Norte América, Francia, Inglaterra e Israel y también en fecha reciente los países del medio oriente como los Emiratos Árabes guiaron el desarrollo de la biotecnología de microalgas para la purificación del agua.

La literatura es pródiga en reportes sobre el uso de la tecnología de microalgas para el tratamiento de efluentes provenientes de diversas fuentes tales como: la industria pesquera, la de productos cárnicos tanto de aves, porcinos o ganado vacuno y los residuos que se generan a partir de la industria vinícola [10].

III. VARIABLES QUE SE DEBEN TOMAR EN CUENTA EN EL CULTIVO DE MICROALGAS

La investigación en el campo de la biotecnología de microalgas, se desarrolla básicamente en dos etapas.

La primera etapa se enfoca en coleccionar en forma sistemática un banco de microalgas provenientes de diversas especies y

mantenerlas vivas cultivándolas en placas de agar para su clasificación final y estudio de los aspectos relevantes de su bioquímica y su fisiología. Se ha podido comprobar que los mejores resultados de campo se obtienen cuando se utilizan microalgas autóctonas de la zona donde se propagará el cultivo.

La segunda etapa involucra desarrollar un protocolo de escalamiento que permita obtener los niveles de producción que se requieren para que el tratamiento sea eficiente en términos cuantitativos y cualitativos, asegurando que el cultivo sea rentable económicamente [11].

Como ya se mencionó en los párrafos anteriores, para la producción a nivel industrial de microalgas se emplean dos tipos de sistemas de cultivo: los sistemas abiertos y los sistemas cerrados.

Los sistemas abiertos consisten en estanques al aire libre de poca profundidad (50 cm) que utilizan directamente el CO₂ atmosférico y la luz solar. Usualmente disponen de un equipo rotatorio con paletas que producen un flujo laminar mezclando el cultivo sin dañar la suspensión de células.

Este tipo de piscinas al aire libre fue la primera tecnología en ser empleada para la purificación de aguas residuales a inicios del siglo pasado. Los sistemas abiertos pueden multiplicar en condiciones óptimas una cantidad considerable de microalgas, pero presentan también una serie de inconvenientes. Al ocupar mayores extensiones y encontrarse expuestos al ambiente son más propensos a la

contaminación por organismos no deseados como otras microalgas foráneas y bacterias [12].

Por esta razón, para el cultivo en sistemas abiertos se prefiere el uso de cepas que puedan crecer bajo condiciones extremas limitando la proliferación de otros tipos de organismos competidores, estas condiciones pueden contemplar valores de pH que son muy altos o bajos, temperaturas específicas que superan las del entorno donde se realiza el cultivo o estrategias basadas en requerimientos nutricionales que son particulares a la variedad de microalga que se desea cultivar.

En los sistemas abiertos, la tasa de difusión y de disolución del CO₂ en el medio de cultivo puede limitar considerablemente la tasa de crecimiento celular, sumado al hecho de que la atmósfera contiene relativamente una baja concentración de ese gas. Otro aspecto que se debe tomar en cuenta es que en estos sistemas abiertos es más difícil aplicar un control estricto de las condiciones ambientales. Al variar una serie de factores ambientales como la temperatura del entorno y como consecuencia la del medio de cultivo y la intensidad lumínica, entre otros, se verá afectada la velocidad de crecimiento de los organismos.

Por otra parte hay que tomar en cuenta que si se mantiene una baja densidad celular se originan otros inconvenientes, además de que baja la productividad del cultivo y se facilita la contaminación por efecto del factor de competencia mutua, se hace más difícil

mantener un control estricto de la temperatura y por otra parte se incrementa el costo para la recuperación de la biomasa. Otro de los parámetros que hay que controlar y que según su valor se pueden tornar en crítico son los incrementos excesivos en el pH del medio durante el proceso de cultivo.

Las microalgas por efecto de la fotosíntesis alcalinizan el medio de cultivo hasta niveles que no pueden ser compensados por el efecto neutralizador que genera la captura del CO₂, debido al equilibrio del buffer bicarbonato y también por la tasa respiratoria de las mismas microalgas que acidifica el medio, por esta razón es imprescindible mantener un control riguroso del pH, de ahí que se prefiera mantener un consorcio microbiano en el que las microalgas crezcan junto con ciertas bacterias, las bacterias al respirar acidifican el medio y colaboran compensando el desbalance de pH [13].

Las microalgas presentan diversos requerimientos en lo que respecta al valor del pH para su óptimo crecimiento. A pH alcalinos se reduce la disponibilidad de CO₂ al medio lo que limita el crecimiento y la tasa de fotosíntesis de las microalgas un factor que limita en especial a los sistemas abiertos como ya se mencionó. El rango de pH ideal para la mayoría de los cultivos de microalgas se encuentra entre 7 y 9. El rango del pH de operación del cultivo se puede controlar en los sistemas cerrados aplicando aire enriquecido con CO₂. Pero se convierte en un elemento limitante en las granjas de algas con estanques al aire libre [14].

En cultivos de microorganismos fotoautótrofos la disponibilidad de luz condiciona la velocidad específica a la que se realiza la fotosíntesis y como consecuencia, determina también la tasa específica de crecimiento. Los sistemas de cultivo cerrados son más versátiles en el sentido de que se pueden iluminar por luz artificial, luz solar o por ambas mientras que los sistemas abiertos solo permiten fuentes naturales de luz.

No solo la intensidad de la luz es un factor importante también cuenta sus características espectrales. Se debe tomar en cuenta que en todos los sistemas de cultivo, las células más cercanas a la superficie iluminada impiden la penetración de la luz hacia el seno del medio de cultivo y producen un efecto de sombreado. En la literatura se han reportado efectos de sombreado mutuo entre las células de los cultivos, para reducir este efecto no deseado se debe garantizar un movimiento celular que sea continuo en el sistema desde y hacia las zonas de luz y de oscuridad [2].

En términos de los requerimientos nutricionales del cultivo, el principal componente que se debe considerar es el anhídrido carbónico. Estos microorganismos logran vivir con altas concentraciones de este gas disuelto en el medio y toleran muy bien otros gases de efecto invernadero como los NO_x a un punto que estos contaminantes atmosféricos son considerados por los investigadores mas como nutrientes para las microalgas que como fuente de sustancias tóxicas [15].

El crecimiento de las algas depende también en gran medida de la temperatura, por lo que se requiere conocer el valor óptimo respecto a este parámetro para cada cepa de forma de poder alcanzar una tasa máxima de crecimiento. Los sistemas fotosintéticos siempre generan una cierta cantidad de calor a causa de que la fotosíntesis no tiene una eficiencia del 100% al convertir la energía luminosa en energía química, al igual que sucede con cualquier otro proceso bioquímico [16].

La conversión teórica de la luz roja en energía química es solo de un 30 % y el 70 % restante se pierde como calor. Por ello, el nivel de enfriamiento que requiere un sistema de cultivo tanto abierto como cerrado dependerá de la intensidad de la luz que incide en el sistema y de la concentración celular del cultivo que recibe la radiación.

La temperatura óptima para el cultivo de las microalgas se encuentra generalmente entre los 20 y 24 °C, no obstante, estos valores pueden variar dependiendo del medio de cultivo y la cepa utilizada [17].

Sea cualquiera que sea el tipo de sistema que se utilice para el cultivo de microalgas siempre se requiere de un tipo de mezclado que sea eficiente con el fin de producir una dispersión uniforme de las células en el medio de cultivo, evitando que se formen gradientes de radiación lumínica, concentración de nutrientes o de temperatura [18].

Uno de los problemas más frecuentes en el cultivo de algas es el daño celular que causa el efecto de cizalla que produce cortes en las células. Este daño colateral se debe con frecuencia a una agitación excesiva de la suspensión celular o de una técnica inadecuada de agitación que causa turbulencia, esta condición en el sistema puede originar daños permanentes en la estructura celular, en particular en las membranas plasmáticas, lo que afecta no solo la tasa de crecimiento sino la misma supervivencia de los organismos. Por el contrario, si se aplica una agitación que es insuficiente se provocará la sedimentación de las microalgas con la subsecuente muerte celular [19].

IV. PARÁMETROS QUE SE DEBEN CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE FOTOBIORREACTORES DE MICROALGAS

En el caso de los sistemas cerrados se emplean recipientes donde la suspensión de microalgas se mantienen bajo agitación continua utilizando bombas de flujo continuo o por burbujeo con aire o con de mezcla de aire enriquecido con CO₂, siendo iluminando mediante fuentes de luz natural y/o artificial [20].

Dentro de los sistemas cerrados de uso más frecuente se encuentran los fotobiorreactores. Estos dispositivos previenen la evaporación del agua y reducen las pérdidas del CO₂, a estas ventajas se suma una probabilidad menor de que el sistema se contamine pudiendo mantener constantes otras

parámetros físicos como la temperatura del cultivo. Otra ventaja colateral que viene del hecho de que son sistemas cerrados es el de reducir los malos olores que desprenden las aguas residuales por su misma naturaleza y origen [21].

Los primeros FBR fueron propuestos por Gudin y Chaumont en 1983 [22], por Pirt y col., en ese mismo año [23], y posteriormente por Torzillo y col., en 1986 [24]. En la última década los fotobiorreactores tubulares y los de placas planas construidos con vidrio o con plástico transparente han recibido mucha atención ya que permiten establecer cultivos de alta densidad celular, que superan en un factor de tres o más veces la productividad en términos de masa celular cuando se les compara con los sistemas abiertos del tipo convencional.

Actualmente existen diversos tipos de fotobiorreactores, algunos modelos se encuentran disponibles en el mercado y otros son relativamente fáciles de construir, entre las opciones de uso más frecuente se encuentran las columnas de burbujeo, los reactores airlift (agitados y aireados mediante burbujas) y los tanques agitados, que se fabrican tanto de tipo tubular como cónico.

Los FBR son generalmente categorizados de acuerdo a su estructura y a su producción de biomasa, los modelos de diseño tubular, los de superficie plana denominados en inglés como tipo flat panel y los de columna vertical son los de uso más común para la mayoría de las aplicaciones industriales y sanitarias [4].

Entre estos dispositivos los fotobiorreactores del tipo tubular son el diseño más sustentable entre los sistemas cerrados, disponen de una buena área de iluminación, excelente tasa de producción de biomasa y son relativamente económicos [25].

El diseño de tipo flat-panel son construidos también a partir de materiales transparentes con la finalidad de maximizar el empleo de la luz solar. Este tipo de reactores permite una buena inmovilización de las microalgas que como veremos en breve es una característica que le brinda una ventaja adicional al sistema y además son de fácil mantenimiento.

Los diseños de tipo columna vertical son los más compactos, económicos y fáciles de operar, lo que los confiere ventajas para el escalamiento del sistema [26].

Entre los aspectos que se consideran que son claves para el diseño de un FBR se debe tomar en cuenta: la distribución de la luz, el tipo de mezclado, la inyección de gas (CO_2) y la facilidad para poder aplicar un flujo laminar sobre material microalgal inmovilizado.

Los sistemas de biorreactores empleados a nivel de laboratorio con frecuencia son iluminados por vía interna o externa con luz artificial mediante el uso de lámparas fluorescentes o diodos emisores de luz (LED).

Existen otros sistemas cerrados para el cultivo de algas que emplean la luz natural con áreas de iluminación que pueden competir con los estanques abiertos, los llamados flat

plates (laminares), los airlift tubulares (de burbujeo) los de tipo serpentín y los de diseño inclinado [27].

Para que la luz artificial sea útil para el proceso fotosintético de las microalgas, los fotones generados deben encontrarse en un rango de longitud de onda entre los 600 y los 700 m [29]. En condiciones reales el factor que determina la actividad fotosintética es la cantidad de energía disponible para cada célula individual, más que la cantidad de energía luminosa incidente [28].

Los parámetros que pueden considerarse básicos para describir la disponibilidad de energía bajo una iluminación intermitente son dos, la relación de los periodos luz/oscuridad (L/O) y la frecuencia de los ciclos L/O. Estos establecen en gran medida el régimen de iluminación, el cual es un indicador de la disponibilidad de luz para una célula individual [29].

La eficiencia en el mezclado es otro factor que juega un rol importante para asegurar una eficiente distribución de la intensidad de luz, en garantizar la transferencia de CO₂ entre la fase gaseosa y la líquida y en el mantenimiento uniforme de pH [30].

Un mezclado adecuado no solo favorece el intercambio gaseoso, también evita la sedimentación celular, la formación de gradientes con otros parámetros ambientales y de concentración de nutrientes, pero su función principal es permitir que todas las células puedan acceder a las zonas iluminadas en un fotobiorreactor [25].

El mezclado puede aplicarse de diversas formas; sin embargo, los FBR del tipo airlift se recomiendan con frecuencia por su sencillez y porque este tipo de diseño no causa un daño mecánico a las células [31].

En general los sistemas de columnas de burbujeo ocasionan un menor daño celular que los sistemas de agitación mecánica. En este tipo de dispositivos el líquido fluye a través de un tubo colocado en el exterior del dispositivo, creando una recirculación natural de tipo reflujo [32] [33].

La inyección de CO₂ mediante el burbujeo directo en el interior de un FBR debe ser considerada también como otro de los parámetros importantes en el diseño. Una aireación rica en CO₂ provee con este gas a una mayor cantidad de microalgas y al mismo tiempo ayuda desoxigenar el medio por efecto del desplazamiento de los gases disueltos lo que evita que ocurra el fenómeno de la foto oxidación que afecta a la eficiencia fotosintética de las microalgas.

El rango de pH de operación del cultivo se puede controlar en los sistemas cerrados al aplicar aire enriquecido con CO₂. No obstante, se debe considerar también el punto de vista económico, ya que una velocidad de aireación mayor involucra mayores costos de producción en el proceso de escalamiento [34].

Una tecnología relativamente reciente para el cultivo de microalgas es la inmovilización en forma de biopelículas de las células en suspensión sobre un soporte inerte (microesferas de agar o polímeros de

acrilamida) lo que permite mantener en el fotobiorreactor un flujo laminar con las aguas residuales incrementándose la eficiencia de captura de los compuestos solubles que se quieren eliminar y además evitando la pérdida de las microalgas en el percolado [35].

V. CONCLUSIONES

Las algas en general y especialmente las microalgas, se han ganado un espacio bien merecido como una alternativa exitosa y viable desde una óptica económica que no presenta grandes complicaciones para ser aplicado como un tratamiento complementario de fase terciaria en la purificación de las aguas residuales y así poder recuperar una buena parte del valioso recurso hídrico para fines ulteriores.

Se han tipificado una serie de factores que pueden ser críticos para el mantenimiento óptimo de los cultivos de microalgas entre estos factores resaltan : la intensidad y calidad de la luz, la fuente de nutrientes , la temperatura de cultivo, el valor del pH del medio, el sistema de mezclado y una geometría del sistema que evite el efecto de sombreado mutuo entre las células

Los fotobiorreactores ofrecen una serie de ventajas cuando se le compara con los sistemas abiertos: mayor facilidad para cosechar la biomasa, mantenimiento de un cultivo libre de contaminación foránea, un mejor control de las condiciones del cultivo, además de permitir que se pueda disponer de un diseño apropiado para cada situación en particular con una menor inversión de capital. Por otra parte, el uso de fotobiorreactores

aparece como una opción muy atractiva si se toma en cuenta que su nivel de escalamiento permite llegar a un excelente compromiso entre el tamaño y la eficiencia del sistema.

Estas ventajas en el diseño permiten la construcción de dispositivos de pequeño tamaño para uso doméstico que se pudieran colocar en las casas, en los edificios comerciales y residenciales o incluso ser aplicado a nivel de urbanizaciones o industrias permitiendo depurar las aguas residuales a pequeña y mediana escala, disminuyendo el nivel de la contaminación del agua antes de esta alcance los grandes colectores, evitando recargar la operación de las plantas de tratamiento convencionales y haciendo el proceso mas sostenible desde la óptica ambiental.

Se ha demostrado ampliamente que los cultivos de microalgas en general y los fotobiorreactores en particular no solo pueden ser competentes para purificar el agua residual , también pueden aportar materias primas valiosas como un subproducto en paralelo con su función depuradora, estos materiales colaterales al ser comercializarlos ayudarían a sufragar los costos operativos del proceso y a reducir el tiempo para recuperar la inversión inicial que hubo que hacer para construir el sistema. Este tipo de enfoque mixto se conoce hoy en día como " biofábricas" y se presenta como una alternativa viable para hacer más atractivo desde el punto de vista económico el uso de este tipo de biotecnologías.

REFERENCIAS

Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente
Ingeniería Ambiental Bucaramanga, Colombia

- [1] Norton T, Melkonian N y Andersen R.(1996). Algal biodiversity. *Phycologia*. 35: 308–326
- [2] Martin F. (2010). Optimization of photobioreactor for astaxanthin production in *Chlorella zofingiensis*. Tesis de Maestría en Ingeniería. National University of Singapore.
- [3] Barbosa M, Janssen M, Ham N, Tramper J y Wijffels R. (2003). Microalgae cultivation in air-lift reactors: modeling biomass yield and growth rate as a function of mixing frequency. *Biotechnology and Bioengineering* 82: 170–179.
- [4] Pulz O. (2001). Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology* 57: 287-293.
- [5] Singh R y Sharma S. (2012). Development of suitable photobioreactor for algae production – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 2347–2353.
- [6] Organización Mundial de la Salud. (2015). Agua. Documento divulgativo. Recuperado de: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/es/>
- [7] UN Water (2009) The United Nations World Water Development Report 3 – Water in a Changing World. (UNESCO Publishing/Earthscan). Universidad Nacional Abierta y a Distancia. (2012). Procesos de Bioremediación.
- [8] Chan, Y. J., Chong, M. F., Law, C. L., & Hassell, D. G. (2009). A review on anaerobic–aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 155 (1).
- [9] Bashana, L, Manuel Morenoa M. , Hernandez J. y Bashana Y.(2002) Removal of ammonium and phosphorus ions from synthetic wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* coimmobilized in alginate beads with the microalgae growth-promotingbacterium *Azospirillum brasilense*. *Water Research* 36 . 2941–2948
- [10] Contreras, L. y Cañizares R (2003). Avances en el diseño conceptual de forobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia*. Vol 28. N° 8
- [11] Carey, R., & Migliaccio, K. (2009). Contribution of wastewater treatment plant effluents to nutrient dynamics in aquatic systems: a review. *Environmental Management*, 44 (2).
- [12] Escorihuela E. Núñez M. , Rosales, R, Mora R y Morales E.(2007) Microalgas presentes en una laguna para pulimento de efluentes de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas. *Rev. Fav. Agron. (LUZ)*. 24 Supl. 1: 225-230
- [13] Lebsky V, Gonzalez-Bashan L y Bashan Y (2001) Ultrastructure of interaction in alginate bead between the microalga *Chlorella vulgaris* with its natural associative bacterium *Phyllobacterium myrsinacearum* and with the plant growthpromoting bacterium *Azospirillum brasilense*. *Can. J. Microbiol.* 47: 1–8
- [14] Candela R. (2016) Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica Monografía de grado para optar el título de Ingeniero Ambiental Universidad Nacional Abierta y a Distancia Escuela de Ciencias
- [15] Van Beilen JB. 2010. Why microalgal biofuels won't save the internal combustion machine. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 4: 41–52.
- [16] Bhosale P. 2004. Environmental and cultural stimulants in the production of carotenoids from microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology* 63: 351–361.
- [17] Tafur, J. y Estrada, L. (2015). Tratamiento de aguas residuales in vitro por medio de la microalga *Chlorella* sp. en el municipio de Barrancabermeja, Colombia. *Revista para Difusión y Divulgación de Avances de Investigación*, 6 (10)
- [18] Gómez, L. (2007). Microalgas: aspectos biológicos y biotecnológicos. *Revista Cubana de Química*, 19 (2).
- [19] Hernández-Pérez A. y Labbé, J. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49 (2).
- [20] Ruiz, A. (2011). Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente. Tesis de grado. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [21] Ozkan A., Kinney K., Katz L., Berberoglu H. (2012). Reduction of water and energy requirement of algae cultivation using an algae biofilm photobioreactor. *Bioresource Technology* 114: 542-548.
- [22] Gudín C Y Chaumont D. (1983). Solar biotechnology study and development of tubular solar receptors for controlled production of photosynthetic cellular biomass. En Palz W, Pirrwitz D (Eds.) Proceedings of the Workshop and EC Contractor's Meeting in Capri. Reidel. Dordrecht, Holanda 184-193.
- [23] Pirt S, Lee Y, Walach M, Pirt M, Balyuzi H Y Bazin M.(1983). A tubular bioreactor for photosynthetic production of biomass from carbon dioxide: Design and performance. *Journal of Chemical and Technological Biotechnology* 33: 35-38.
- [24] Torzillo G, Pushparaj B, Bocci F, Balloni W, Materassi R y Florenzano G.(1986). Production of *Spirulina* biomass in closed photobioreactors. *Biomass* 11: 61-64.
- [25] Uguw C, Aoyagi H y Uchiyama H.(2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology* 99: 4021–4028.
- [26] Reyna R, Cristiani E, Hernándezr D, Thalasso F y Cañizares R. (2010). Hydrodynamic and mass transfer characterization of a flat-panel airlift photobioreactor with high light path. *Chemical Engineering and Processing* 49: 97–103.
- [27] Degen J, Uebele A, Retze A, Schmid-Staiger U y Trosch W. (2001). A novel airlift photobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect. *Journal of Biotechnology* 92: 89–94.
- [28] Fernandes B, Dragoner G, Teixeira J y Vicente A. (2010). Light regime characterization in an airlift. Photobioreactor

- for production of microalgae with high starch content. *Applied Biochemical and Biotechnology* 61: 218–226.
- [31] Fernández J, García J, García F, Molina E, Al-Dahhan M, Huping L y Kemoun A. (2002). Integration of fluid dynamics, light regime and photosynthetic response in photobioreactors. 1st Congress of International Society for Applied Phycology. Roquetas de Mar, Almería, España
- [32] Kommareddy A y Anderson G. (2003) . Study of light as a parameter in the growth of algae in a photo-bio reactor (PBR). ASAE Paper No. 034057. ASAE, St. Joseph, Michigan.
- [33] Chisti Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 25: 94–306.
- [34] Contreras-Flores C, Peña-Castro J y Flores-Cotera L. (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia* 8: 450-456.
- [35] Barbosa MJ, Hadiyanto H y Wijffels RH. (2004). Overcoming shear stress of microalgae cultures in sparged photobioreactors. *Biotechnology and Bioengineering* 85: 78-85.
- [36] Zhang K, Kurano N y Miyachi S. (2002). Optimized aeration by carbon dioxide gas for microalgal production and mass transfer characterization in a vertical flat-plate photobioreactor. *Bioprocess Biosystems Bioengineering* 25, 97–101.
- [37] Fernández J. Mosquera M y Curt M. (2014) Uso de microalgas inmovilizadas en biofilm para tratamiento de aguas residuales. Universidad Politécnica de Madrid.

NOTAS

Los artículos que aparecen citados en las referencias se encuentran disponibles en Google Académico (actualizados en abril de 2019).

La propagación *in vitro* de plantas con Sistemas de Inmersión Temporal. Una Tecnología Apropriada para la agricultura sustentable

Rafael Muñiz¹
rmuniz53@gmail.com

¹Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería (CIDI). Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, Venezuela.

Historia del Artículo

Recibido 6 de Junio de 2018

Aceptado 19 de Julio de 2018

Disponible online: 19 de Julio de 2018

Resumen: En los últimos años la agricultura ha experimentado un profundo proceso de transformación que se ha reflejado en un nivel intenso de industrialización acompañada con la subsecuente incorporación de adelantos tecnológicos en los procesos productivos. Sin embargo, este proceso ha reflejado un carácter muy dispar al haber conducido también a una agricultura muy heterogénea. En particular para el caso de nuestros países en vías de desarrollo se plantea la necesidad de producir más alimentos con una alta calidad sin la disrupción del equilibrio de los ecosistemas, fortaleciendo el desarrollo territorial y local, generando nuevos puestos de trabajo, reduciendo así la migración masiva de la población rural a las zonas urbanas. Una tecnología apropiada y apropiable es aquella que la pueden aplicar con éxito los pequeños agricultores, promoviendo un mayor rendimiento de la tierra productiva e incrementando la productividad de los cultivos. Para poder lograr este propósito se requiere entre otras cosas implementar biotecnologías modernas que sean simples, eficientes, de bajo costo y replicables que permitan mejorar la calidad de los procesos productivos de los pequeños productores. La propagación *in vitro* de plantas por los métodos tradicionales satisface varios de estos requerimientos pero requiere de personal especializado, de laboratorios acondicionados a tales fines y de insumos costosos. La tecnología de Biorreactores denominada Sistemas de Inmersión Temporal (SIT) es una opción viable que ofrece considerables ventajas para la propagación *in vitro* de plantas bajo el enfoque de las tecnologías apropiadas. El presente trabajo analiza algunos aspectos relevantes del diseño y la aplicación de los SIT en la biotecnología agrícola, material que servirá de insumo documental para el diseño y construcción de un SIT de bajo costo en los laboratorios de la Universidad Católica Andrés Bello.

Palabras Clave: Biotecnología Agrícola, Propagación *in vitro* de Plantas, Tecnologías Apropriadas, Biorreactores, Sistemas de Inmersión Temporal.

The *in vitro* propagation of plants with Temporary Immersion Systems. An Appropriate Technology for sustainable agriculture

Abstract: In recent years, agriculture has undergone a profound process of transformation that has been reflected in an intense level of industrialization accompanied by the subsequent incorporation of technological advances in production processes. However, this process has shown a very disparate character since it has also led to a very heterogeneous agriculture. Particularly in the case of our developing countries, there is a need to produce more food with a high quality without disrupting the balance of ecosystems, strengthening territorial and local development, generating new jobs, thus reducing migration massive from the rural population to urban areas. An appropriate and appropriable technology is one that can be applied successfully by small farmers, promoting a higher yield of productive land and increasing the productivity of crops. In order to achieve this purpose, among other things, it is required to implement modern biotechnologies that are simple, efficient, low cost and replicable to improve the quality of the productive processes of small producers. The *in vitro* propagation of plants by traditional methods satisfies several of these requirements but requires specialized personnel, laboratories conditioned for such purposes and expensive inputs. Bioreactor technology called Temporary Immersion Systems (TIS) is a viable option that offers considerable advantages

for the in vitro propagation of plants under the approach of appropriate technologies. This paper analyzes some relevant aspects of the design and application of the TIS in agricultural biotechnology, material that will serve as a documentary input for the design and construction of a low-cost TIS in the laboratories of the Andres Bello Catholic University.

Keywords: Agricultural Biotechnology, *in vitro* Propagation of Plants, Appropriate Technologies, Bioreactors, Temporary Immersion Systems.

I. INTRODUCCIÓN

“ Es algo sano y necesario volver la mirada a la tierra para contemplar sus bellezas y poder reconocerlas con asombro y humildad “.

Rachel Carson.

Precursora del movimiento ecologista. Frase tomada de su obra: Primavera Silenciosa (1962)

En un contexto global, los sistemas actuales de producción y distribución de alimentos no han logrado alimentar de una forma eficiente a la población del planeta . El número total de personas subnutridas en el planeta en 2010 se estimó en 925 millones, y en los países en desarrollo la prevalencia de la subnutrición supera al 16%. Cerca del 75% de las personas más gravemente afectadas por las deficiencias en la alimentación viven en zonas rurales y sus medios de subsistencia dependen directa o indirectamente de la agricultura.

Por otra parte se estima que la población de la tierra pasará de cerca de 7 millardos en 2010 a una cifra que va a sobrepasar los 9000 millones para el 2050, con estos valores demográficos la seguridad alimentaria mundial se verá amenazada sin tomar en cuenta los retos que plantea el cambio climático como veremos más adelante.[1]

El empleo de productos agrícolas en la producción de biocombustibles complica todavía más el panorama global. Se estima que para el próximo 2020, en los países industrializados se alcancen a consumir unos 150 kg per cápita anuales de maíz en forma de etanol, una cifra similar a los índices de consumo de cereales en los países en desarrollo sin tomar en cuenta en este balance la demanda en caña de azúcar en el hemisferio sur del planeta. [2]

Tales cambios en la demanda de los cultivos deben impulsar hacia un considerable incremento en la producción mundial de los cultivos destinados para la alimentación de las personas y de los animales a un nivel sin precedentes que se estima entre un 70% y 80%. [3]

En la mayoría de los países en desarrollo existe poco margen para ampliar las tierras cultivables. En América Latina la situación es diferente, aunque existen tierras disponibles, la mayoría de ellas están degradadas y/o sufren limitaciones relativas al tipo de suelo.

Por consiguiente para 2030 ese incremento del 80% necesario en la producción de alimentos tendrá que proceder de una intensificación agrícola que se traduzca en el aumento del rendimiento y de la intensidad del cultivo en la misma área disponible a través de prácticas sostenibles y sin duda no se podrá

continuar con las prácticas degradantes del monocultivo y el uso irracional de los insumos agrícolas.

En los próximos años la intensificación de la producción agrícola será necesaria de manera particular en zonas de producción marginales que son las que presentan condiciones productivas menos fiables, con menor calidad del suelo, menor acceso al agua y climas menos favorables.

Para enfrentar un desafío de magnitud global de esa naturaleza se requiere aplicar una estrategia de adaptación al cambio climático con escenarios variables de alteración de la temperatura, fuertes precipitaciones o sequías con la subsecuente incidencia de plagas, todos estos efectos determinarán qué cultivos se pueden y se deben producir y cuándo hacerlo, además de evaluar con atención cual sería su rendimiento potencial.

En el corto plazo se prevé que aumenten la variabilidad climática y los episodios meteorológicos extremos en todas las regiones del planeta lo que tendrá efectos nocivos en los rendimientos y en la calidad de las cosechas. Una tercera parte de las emisiones de gases de efecto invernadero proviene directa o indirectamente del sector agropecuario lo que supone un reto aun mayor para los sistemas convencionales que requieren una gran cantidad de recursos y contaminan el ambiente.[4]

Bajo este escenario de cambios climáticos los pequeños productores, quienes dependen en una gran medida de los bienes y servicios ecosistémicos para obtener los alimentos, el combustible y la fibra para sus familias y para su venta en los mercados locales serán los más vulnerables a la reducción de la calidad y la cantidad de los recursos naturales disponibles.

Dentro del sector agrícola en América Latina los pequeños productores que sustentan este tipo de agricultura representan hasta un 80% de la producción total de ese sector y absorben más del 60% del empleo.[5]

La intensificación sostenible del sector agrícola que propone la FAO se ha definido como el incremento de la producción a partir de la misma área de tierra al tiempo que se reducen los efectos negativos para el medio ambiente y se aumenta la contribución al capital natural y humano y al flujo de servicios.[6]

Parte del desafío consiste en implementar tecnologías simples que sean sostenibles incluyendo a las biotecnologías y también reforzando los programas de incentivos para la agricultura familiar, todo bajo el

cobijo del paraguas de una legislación justa y de políticas agrarias de vanguardia.

El Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) define la biotecnología como:

« toda aplicación tecnológica que utilice sistemas biológicos y organismos vivos o sus derivados para crear o modificar productos o procesos para usos específicos ». [7]

Las biotecnologías agrícolas en un sentido amplio, incluyen tanto los conocimientos tradicionales y locales, prácticas orgánicas y agroecológicas, mejoramiento genético, aplicación del cultivo de tejidos y de técnicas genómicas.

Una biotecnología agrícola que sea apropiada y apropiable implica el diseño y la implementación de herramientas que contribuyan al desarrollo sostenible y además cumplan con otros requisitos: ser técnicamente factibles dentro del nivel de desarrollo técnico-científico de un país; proveer beneficios tangibles a los destinatarios; ser ambientalmente seguras, y social, económicamente y culturalmente aceptables.

Sin embargo, para que su inserción como biotecnologías agrícolas apropiadas y apropiables se adapte a las condiciones de producción y a la realidad socioeconómica y cultural de la región, se deben superar un conjunto de obstáculos científicos y tecnológicos, legales y regulatorios, que impiden muchas veces la eficiente y equitativa utilización de estos productos y servicios.

II. LA TECNOLOGÍA DE PROPAGACIÓN *in vitro* DE PLANTAS

La biotecnología se utiliza para resolver problemas en todos los aspectos de la producción agrícola: para elevar y estabilizar el rendimiento de los cultivos, mejorar la resistencia a las plagas, a condiciones abióticas adversas como la sequía y el frío, y aumentar el contenido nutricional de los alimentos. Se utiliza también, con el fin de crear material de propagación sano y de bajo costo y está proporcionando nuevos instrumentos para el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades de las plantas y para la conservación de los recursos genéticos y su modificación mediante los procesos de transgénesis. [8]

La propagación *in vitro* es una de las aplicaciones más extendidas hoy en día para la producción masiva de plantas, esta técnica consiste en regenerar las plantas partiendo de explantes o propágulos que proceden de diversas fuentes de material vegetal y que se cultivan en medios nutritivos apropiados, como fuente de material para la propagación se pueden utilizar: ápices de raíces o de tallos, embriones, ovarios, óvulos, anteras y polen entre otros. [9]

Los explantes crecen en un ambiente artificial controlado dentro de recipientes de vidrio o de plástico que permitan aplicar algún tipo de esterilización. Esta forma de cultivar las plantas tiene dos características que son fundamentales: la asepsia que mantiene el material libre de patógenos durante su periodo de

crecimiento, en el que es más sensible a la contaminación y la posibilidad de controlar cierto número de factores que afectan el crecimiento de las plántulas.

El fundamento de estas técnicas se basa en la teoría de la totipotencia celular. Esta teoría sostiene que existe la posibilidad de obtener una planta entera a partir de cualquier célula viva si se ajustan de forma conveniente las condiciones químicas, físicas y microbiológicas del cultivo.

Un primer paso que se debe cumplir en los procedimientos de propagación *in vitro* es modificar los medios de cultivo para lograr la pérdida de la diferenciación del tejido que se utiliza inicialmente como fuente de material para la propagación (explante). En una etapa posterior se busca la inducción de una nueva diferenciación de estas células de partida, lo que produce variadas respuestas morfológicas y fisiológicas en el material vegetal.

El cultivo *in vitro* de un órgano o de un fragmento de un órgano, con el objeto de lograr su reproducción vegetativa, se desarrolla siguiendo una estrategia constituida por varias etapas: la iniciación del cultivo en condiciones *in vitro*, la multiplicación activa de las estructuras capaces de desarrollarse como individuos idénticos a la planta donante y el paso de la heterotrofia a la autotrofia, con la consiguiente adaptación de las plántulas obtenidas a las condiciones de cultivo *in vivo*. Es en la etapa de multiplicación de la propagación *in vitro*, (denominada micropropagación) donde es necesario enfocar la atención para poder implementar alternativas que favorezcan la eficiencia de todo el proceso. [10]

El cultivo *in vitro* de plantas es una técnica que exige un control específico del medio ambiente del cultivo, tanto en sus aspectos físicos como químicos. Las plantas continuamente responden a una serie de estímulos externos e internos que cambian su fisiología y su morfología.

Entre los factores que se deben tomar en cuenta se encuentran: la intensidad y calidad de la luz que reciben los explantes, la concentración de los nutrientes minerales de los compuestos orgánicos y de los reguladores del crecimiento vegetal del medio nutritivo, la cantidad del agua que se aplica y la frecuencia con que se riegan, las características del material que les sirve de soporte a los explantes, que con frecuencia es el agar un gel que se obtiene a partir de algas, además se debe controlar la temperatura del cultivo, el pH del medio nutritivo y los niveles de gases que se producen y se consumen en el sistema tales como CO₂, O₂ y el etileno (C₂H₄), un hidrocarburo gaseoso que actúa como hormona vegetal. [11]

Reproducir en condiciones de laboratorio todos los factores que conforman el ambiente natural de la planta es algo demasiado complejo y por esa razón hay que conformarse con una simplificación aproximada a la realidad de las condiciones naturales de crecimiento seleccionando aquellos factores que se puedan mantener controlados.

Esta técnica posee un gran potencial comercial debido a la velocidad de propagación, la alta calidad de plantas que se obtienen por lo que ha permitido propagar miles de plantas sin necesidad de tener que disponer de semillas o de depender de un limitado número de brotes para la propagación vegetativa. El progreso que se ha podido lograr con este tipo de biotécnicas aporta un gran avance en los estudios bioquímicos, fisiológicos y moleculares.

En base al conocimiento adquirido hasta ahora con el cultivo de tejidos vegetales, acoplado a su vez con las técnicas de la ingeniería genética permiten obtener clones de plantas de difícil propagación vegetativa o que poseen características de interés particular o variedades de las cuales sólo existen pocos individuos y permiten a su vez obtener plantas transformadas con nuevas características genéticas de importancia en la agricultura actual. En adición el cultivo *in vitro* ofrece otro tipo de ventajas: el crecimiento es continuo a lo largo del año sin hacer diferenciación por las estaciones climáticas al crecer en cuartos controlados, y se requiere de menos espacio y mantenimiento para la propagación que en los métodos tradicionales. [12]

Sin embargo, igual que sucede con otros tipos de tecnologías, la propagación *in vitro* adolece de algunas limitaciones tales como: es más costosa que los métodos tradicionales de producción de plantas, requiere de un personal capacitado y de instalaciones especiales y los reactivos para los medios de cultivo y otros insumos son difíciles de conseguir en países en vías de desarrollo y son costosos.

Debido a estas limitaciones se han venido probando desde la década de los 60 y 70 como una alternativa al sistema de propagación tradicional el uso de un tipo de Biorreactores denominados Sistemas de Inmersión Temporal (SIT). [13]

III. LOS SISTEMAS DE INMERSIÓN TEMPORAL

La expectativa de poder disponer de otro tipo de sistemas que demuestren una mayor eficiencia para la propagación de plantas *in vitro* superando a los sistemas convencionales que se describen en la sección anterior ha planteado la necesidad de implementar otro tipo de tecnologías con el propósito de aumentar la eficiencia y la reproducibilidad en los resultados y a su vez disminuir los costos.

Uno de los desarrollos que han resultado ser más prometedores en ese sentido es el uso de Biorreactores para el cultivo de tejidos vegetales, con especial atención en una variante de estos dispositivos que se conoce como Sistemas de Inmersión Temporal (SIT).

Un Biorreactor es un sistema de cultivo usualmente automatizado cuya principal función es proveer al cultivo de un ambiente controlado para lograr las condiciones óptimas para el crecimiento celular y para la producción de subproductos de interés comercial provenientes del cultivo.

Los Biorreactores presentan considerables ventajas sobre los recipientes normales que se emplean para el cultivo tradicional de células vegetales, ya que ofrecen la posibilidad de poder controlar mejor las

condiciones ambientales del cultivo y facilitan el escalamiento del proceso.

La primera vez que se hizo crecer células vegetales en reactores, fue en 1960 usando varios diseños comerciales y no comerciales adaptados a partir de sistemas de cultivo de células animales. [14]

El desempeño de cualquier Biorreactor depende de varios parámetros que contemplan los siguientes aspectos: se debe mantener una concentración elevada de la biomasa y las células deben permanecer uniformemente distribuidas en todo el volumen del cultivo a fin de prevenir la sedimentación o la flotación y de esta forma asegurar también una distribución uniforme de los nutrientes en el reactor aplicando una agitación que sea efectiva; se requiere mantener condiciones de asepsia; un control preciso de la temperatura del sistema y se debe suministrar oxígeno (aire) a un nivel que sea adecuado para asegurar el incremento de la biomasa. [15]

Estos dispositivos presentan también algunas desventajas uno de los problemas que con mayor frecuencia se presenta en los cultivos *in vitro* con Biorreactores (en particular con el tipo de inmersión permanente) es el fenómeno de la hiperhidricidad conocido también como vitrificación, este es un proceso degenerativo que daña a los explantes por asfixia y que se asocia con la permanencia por un tiempo demasiado prolongado del material vegetal en el medio de cultivo otros dos problemas frecuentes son la variación en el tamaño de las plántulas y la pérdida de material vegetal debido a la contaminación. [16]

Los SIT son sistemas de cultivo periódicos semiautomatizados o totalmente automatizados, basados en ciclos alternados de inmersión temporal del tejido vegetal cultivado en el medio líquido, seguido de drenaje y exposición del tejido de la planta a un entorno gaseoso.

Los SIT aportan una serie de características que son benéficas: en comparación con otros tipos de Biorreactores al evitar la inmersión continua del material vegetal en el medio de cultivo, este tipo de sistemas proveen una adecuada transferencia de oxígeno, facilitan los cambios secuenciales y automatizados del medio de cultivo, reducen la contaminación microbiana y tienen un costo menor a la de otros reactores convencionales. [17]

Por otra parte se ha señalado que la Inmersión Temporal reduce algunos de los problemas que se presentan en los cultivos de inmersión permanente con un medio de cultivo líquido estático, como: la escasa supervivencia y la pobre calidad de los propágulos, reduce la vitrificación, permite un intercambio bidireccional de las plantas con el medioambiente renovando los gases dentro del frasco de cultivo favoreciendo el crecimiento y el desarrollo de los propágulos. [18]

La clave del éxito con los SIT está muchas veces en establecer los tiempos de inmersión y la frecuencia requerida para cada especie. Este sistema es útil en cuanto previene la falta de oxígeno en el medio,

controla el ambiente gaseoso con cada inmersión y facilita la renovación de medio. [19]

Se plantea, además, que en este tipo de sistema de cultivo las condiciones de renovación periódica de la atmósfera interna del recipiente de cultivo logran en las plantas cultivadas una mejor relación entre la fotosíntesis y la transpiración, lo cual permite una mayor asimilación de nutrientes del medio de cultivo para su crecimiento

La estrategia de adaptación de las plantas a las condiciones de los Sistemas de Inmersión Temporal (SIT) se desarrolla por una combinación de características morfológicas, bioquímicas y fisiológicas que permiten un uso más eficaz de los recursos del medio interno en el recipiente de cultivo.

Este tipo de sistemas reduce los costos de la propagación in vitro hasta en un 20% en comparación con otros sistemas de cultivo líquido y hasta en un 46% con respecto al medio semisólido, esto una vez que se han hecho las inversiones iniciales en la compra de los equipos correspondientes. [20]

Las labores de mano de obra se reducen también, lo mismo que el espacio al permitir la propagación masiva, y se aumentan los rendimientos y la calidad del material. Además, de acuerdo con numerosos estudios, un gran número de especies tropicales muestran un mejor crecimiento y desarrollo en las etapas siguientes del proceso de aclimatación en las condiciones de campo cuando se propagan mediante los SIT. [21]

IV. VARIANTES DE SISTEMAS DE INMERSIÓN TEMPORAL

Existen diversos diseños de Biorreactores que se han aplicado con éxito para el cultivo de plantas in vitro, y se les suele clasificar en base a dos criterios: generales, según su sistema de agitación que puede ser de tipo mecánico o neumático y también de acuerdo al tipo de proceso de inmersión que puede ser permanente o de inmersión temporal (o transitoria) en la cual los explantes permanecen en contacto con el medio nutritivo solo durante unos minutos por día en base a un programa de ciclos siguiendo una determinada frecuencia. [22]

Los Sistemas de Inmersión Temporal de uso más frecuente en la propagación in vitro de plantas se ubican dentro de cuatro modelos que se diferencian según su principio de operación:

A. *Sistemas de balancín*

Los sistemas de balancín utilizan una plataforma conectada a un dispositivo mecánico para inclinar en un ángulo dado una serie de recipientes donde se propagan los cultivos, de modo que el medio se pueda transferir de un extremo del envase de cultivo al otro y viceversa.

En general los recipientes están hechos de policarbonato transparente autoclavable y tienen forma de rectángulo con una abertura de boca ancha en la parte superior del envase, cerrada por un tapón de rosca con un de filtro en su interior para evitar la contaminación.

Después de la inoculación, los envases se colocan en bastidores y se agitan mecánicamente. Las inclinaciones de la plataforma crean pequeños frentes de onda y alternativamente sumergen y airean los propágulos cultivados. [23]

La principal ventaja del sistema de balancines es que se pueden acomodar grandes cantidades de envases de cultivo en un solo dispositivo y no es necesaria una conexión adicional a una línea aérea y con el resto del sistema de control que implica el uso de estos tipos de dispositivos.

Las limitaciones de los sistemas de balancines se relacionan con la necesidad de construir una plataforma basculante impulsada electromecánicamente lo que puede aumentar los costos de inversión y de energía a menos que se simplifique su diseño y se empleen materiales de bajo costo enfocando dicho diseño dentro del esquema de las tecnologías apropiadas que mencionamos antes en la introducción del artículo.

Las plataformas basculantes requieren más espacio para funcionar correctamente y esto se puede reflejar en el costo de producción por unidad de espacio en la cámara de crecimiento, sin embargo existe la alternativa de mantener los cultivos bajo luz solar natural que supera en intensidad y en calidad a la luz artificial fluorescente de las cámaras de crecimiento. Si los envases de cultivo no permiten una buena renovación del aire, y no se dispone de otras opciones para su ventilación forzada se debe considerar el reemplazo del medio nutritivo con una cierta frecuencia.

B. *Sistema de frascos gemelos*

El sistema de frascos gemelos es uno de los primeros SIT desarrollados. [24]. Básicamente, el sistema consta de dos contenedores (frascos o botellas de boca ancha), que están conectados entre sí por un tubo en forma de U invertida de vidrio o de plástico y tubos de silicona. Uno de los dos contenedores cumple la función de servir como cámara de cultivo, mientras que el otro contenedor se usa como un tanque de almacenamiento del medio nutritivo.

Cada contenedor está conectado a su propia línea de aire presurizado, controlada por dos relojes temporizadores independientes, intercaladas se colocan válvulas solenoides de tres vías.

Aunque en general, son fáciles de operar y pueden mantener la esterilidad durante largos períodos de cultivo entre sus limitaciones se encuentran la automatización que se requiere en este tipo de sistema, (la necesidad de dos relojes con temporizador y válvulas de solenoide, compresor y filtros de membrana).

C. *Sistemas de reflujos*

Los sistemas de reflujos se pueden considerar como una modificación simplificada de los sistemas de frascos gemelos. El sistema consta de dos recipientes: un recipiente superior que funciona como cámara de cultivo donde los explantes de la planta se colocan sobre un soporte de goma espuma, el segundo recipiente sirve como tanque de almacenamiento del

medio nutritivo y se coloca debajo del recipiente de cultivo.

Los dos recipientes están interconectados por puertos externos. Un soporte de goma espuma ayuda a mantener la humedad (entre un 85-90%) durante el período de exposición (no inmersión) y cumple también con la función de actuar como un rociador de aire durante la fase de inmersión. [25]

Las ventajas de los sistemas de reflujo son su construcción simple y confiable, la automatización simplificada y un menor gasto de energía. La distribución de luz no uniforme dentro del recipiente de cultivo y la falta de opciones para la ventilación forzada se encuentran entre las principales desventajas del sistema.

D. Reactor de Inmersión Temporal Automático (RITA)

El sistema RITA fue desarrollado por el CIRAD de Francia y se utiliza con mucha frecuencia para el cultivo intensivo de plantas *in vitro*.

El sistema consiste en un único recipiente de 500 ml fabricado de material plástico autoclavable con dos compartimentos, separados por una bandeja instalada con un soporte de malla y un tubo de plástico, colocado en su centro. [26]

El recipiente se cierra con una tapa de rosca que a su vez viene, equipada con puertos externos centrales y laterales en la parte superior. Los puertos de acceso laterales están aislados del entorno por filtros de membrana y el puerto central se está conectado a una línea de aire comprimido controlada por un reloj temporizador y una válvula solenoide de tres vías.

El compartimento superior del recipiente es la cámara de cultivo, mientras que el compartimento inferior es el tanque de almacenamiento medio. Las ventajas de RITA son la operación simple y confiable, el espacio compacto para el alojamiento de los aparatos y el mantener un nivel de humedad relativa adecuado con separación completa de los propágulos y el medio líquido.

Todos los elementos internos están conectados entre sí y se pueden manipular como una sola pieza lo que facilita el manejo de este dispositivo en comparación con otros sistemas como los frascos gemelos o los sistemas de reflujo en que se basa su principio de operación. Las principales desventajas de los sistemas son la incapacidad para la renovación del medio nutritivo y la falta de opciones para la ventilación forzada y el enriquecimiento de CO₂ en caso de que este sea requerido en alguna aplicación.

V. ALGUNOS PARÁMETROS A CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DE UN SIT

Las condiciones de cultivo en los SIT pueden afectar el crecimiento de las plantas *in vitro* y su estado fisiológico, a través de cambios en el medio ambiente durante todo el período de cultivo.

Para lograr el crecimiento o multiplicación eficiente de los tejidos en los SIT es necesario controlar al menos

tres aspectos fundamentales a) determinar la duración y frecuencia apropiadas de las inmersiones, con lo cual se variarían las condiciones de cultivo dentro del recipiente: b) el suministro adecuado de nutrientes y c) la atmósfera gaseosa que rodea a los explantes. [27]

Además se debe considerar que los SIT no utilizan dispositivos de agitación mecánica como se aplica con frecuencia en otros tipos de Biorreactores, por lo que la dislocación de los propágulos cultivados, si los hay, se realiza únicamente por el poder de las fuerzas hidrodinámicas durante los períodos de inmersión.

Bajo estas condiciones, los tejidos de las plantas cultivadas experimentan una tensión de corte mínima que preserva la integridad del cultivo y mejora adicionalmente la morfología y la fisiología de los órganos.

Los otros parámetros que afectan la eficacia de los Sistemas de Inmersión Temporal son: la combinación entre una ventilación eficiente de los tejidos de la planta y el contacto intermitente entre toda la superficie del tejido y el medio líquido, el volumen del medio y cantidad de medio. [28]

A. El tiempo y la frecuencia de inmersión

En la propagación de plantas mediante el uso de Biorreactores de Inmersión Temporal, el tiempo y la frecuencia de inmersión son dos parámetros decisivos para lograr la eficiencia del sistema.

El contacto intermitente del medio nutritivo con los explantes proporciona una capa delgada de medio que se adhiere en toda la superficie del explante por cohesión y se renueva con cada inmersión. además dichos parámetros se encuentran relacionados tanto en la asimilación de los nutrientes por los explantes, como en la renovación de la atmósfera dentro del recipiente de cultivo evitando la acumulación de gases perjudiciales como el etileno, que promueve la senescencia de los tejidos, así se facilita la regulación de la concentración de CO₂ y se mejora la oxigenación de los tejidos, ajustando los tiempos y frecuencias inmersión se puede eliminar o controlar la hiperhidricidad, que afecta gravemente a los cultivos en medio líquido. [29]

Por lo general, el período de inmersión es corto de unos minutos, mientras que el período de exposición al aire se prolonga por varias horas. El ajuste preciso de las duraciones de los períodos de inmersión y exposición puede reducir significativamente la asfisia del tejido vegetal al crear las condiciones para un suministro óptimo de humedad y nutrientes con un mínimo contacto con el líquido.

B. El volumen del medio de cultivo

Optimizar el volumen de medio de cultivo y del recipiente mejora sustancialmente la eficacia, por una parte los cultivos producen sustancias químicas extracelulares que estimulan la formación de brotes y estas se diluyen cuando se utilizan grandes volúmenes de medio. Pero por otra parte un volumen adecuado de medio nos permite garantizar la cantidad adecuada de nutrientes, evita las pérdidas debido al consumo de los explantes y la evapotranspiración y facilita la

dilución de productos tóxicos o inhibidores de procesos favorables o no a la morfogénesis. [30]

C. *Las dimensiones del recipiente para el cultivo in vitro*

En general para todos los Sistemas de Inmersión Temporal, el volumen del frasco es mayor que el de los recipientes utilizados en los procedimientos convencionales de propagación in vitro con medio semisólido.

Este parámetro influye significativamente en los SIT ya que a mayor capacidad del frasco de cultivo, aumenta el volumen gaseoso por explante; siendo esta una medida de la densidad de inóculo que se requiere para realizar el escalado del sistema. No obstante bajo este contexto, el uso de contenedores más grandes significa que se utilizarán mayores volúmenes de medio de cultivo, lo que puede tener un efecto positivo o negativo sobre el material vegetal en la proliferación y en el crecimiento en base a lo que se plantea en el párrafo anterior. [31]

D. *El sistema de aireación*

La exposición directa del tejido vegetal al ambiente gaseoso simplifica significativamente el transporte de oxígeno entre las células cultivadas, en contraste con el cultivo totalmente sumergido, donde el transporte de oxígeno presenta resistencia en la interfase entre las zonas límite entre gas-líquido y líquido - sólido. El transporte más eficiente del oxígeno contribuye a mejorar el intercambio de gases lo que conduce a una menor incidencia de trastornos fisiológicos como la asfixia. [32]

La inmersión temporal ha demostrado claramente ser un sistema de cultivo de tejidos vegetales más eficiente que otros sistemas que no proveen de suficiente oxígeno al cultivo.

El ambiente interior de un recipiente de cultivo de tejidos es diferente del ambiente circundante exterior, dependiendo de los tejidos dentro del recipiente y el fotoperíodo la concentración de CO₂ será más alta o más baja, a diferencia de las concentraciones de etileno y humedad relativa que son altas, principalmente debido a los efectos combinados de evaporación continua del medio de cultivo y la transpiración de las hojas, las plantas obtenidas bajo las condiciones antes descritas, pueden presentar alteraciones en su estructura anatómica, morfológica y fisiológica. [33]

La aireación forzada se utiliza para inyectar el aire desde el exterior al interior de los recipientes de cultivo y viceversa, es uno de los métodos más eficaces para la mejorar la ventilación y el principio básico es crear una presión positiva dentro del recipiente, que conduce a la renovación completa de la atmósfera

Con este sistema, la composición gaseosa (CO₂) y el vapor de agua o cualquier otro gas puede ser controlado mediante el uso de una válvula, un controlador de flujo y un compresor de aire. La humedad relativa que resulta de la ventilación forzada puede estimular la transpiración de las plantas, lo que a su vez permite una mejor y menos prolongada

adaptación de las plantas a las condiciones ex vitro en las siguientes etapas de la propagación.

Este efecto se debe a que al aumentar el nivel de CO₂ y conjuntamente suprimir los azúcares del medio, la planta se verá forzada a fotosintetizar y a iniciar una serie de eventos fisiológicos como la apertura y cierre estomático. [34]

La mayoría de los sistemas comerciales que se encuentran a disposición en el mercado se basan en los modelos de tipo neumático, estos dispositivos han demostrado operar con muy buenos resultados y trabajan acoplados a sistemas automáticos de control, sin embargo en general este tipo de sistemas son costosos, al menos para los pequeños productores y no son muy fáciles de fabricar, en particular en los países en vías de desarrollo.

En adición a los requerimientos técnicos también se requiere de un cierto nivel de preparación por parte del personal que los opera, todos estos elementos que mencionamos alejan a muchos de estos sistemas comerciales del ideal que se busca con las tecnologías apropiadas y apropiables que ya mencionamos antes en este artículo.

VI. CONSIDERACIONES FINALES

En este contexto global en que nos encontramos actualmente que se ha caracterizado por aspirar a la meta del crecimiento continuo por mantener un ritmo acelerado y con frecuencia a veces no bien planificado, el efecto del aumento en el precio de los alimentos por una parte y los impactos del cambio climático por otra, han llevado a que los países comiencen a revalorizar dentro de sus políticas el papel que desempeñan los pequeños agricultores como un sector estratégico para la seguridad alimentaria.

En ese contexto la promoción de las biotecnologías simples como una herramienta de innovación jugara un rol fundamental para dar un impulso a la nueva agricultura.

Sin embargo para que la aplicación de las técnicas biotecnológicas no resulte en actividades aisladas con poca relevancia y se logre la aceptación por parte de los pequeños productores del sector agrícola, es necesario enmarcar dichas tecnologías en el concepto de una biotecnología apropiable y apropiada para que pueda beneficiarlos en cuanto a sus requerimientos, capacidades, prioridades y limitaciones.

El desarrollo de programas de investigación orientados al diseño, adaptación y puesta en marcha de las tecnologías apropiadas es un campo que se viene desarrollando con fuerza desde mediados del pasado siglo y que cada vez aporta un mayor número de soluciones viables a los problemas de los sectores menos favorecidos de nuestras sociedades y en particular en el sector rural.

A partir de los propósitos y objetivos coincidentes entre la academia y los agricultores han surgido en el pasado soluciones muy prometedoras por sus aplicaciones prácticas en términos de su simplicidad, eficiencia y eficacia. Confiamos que entre las humildes

contribuciones que pueda aportar este artículo se encuentre la de estimular en especial a los jóvenes ingenieros a dirigir su curiosidad y su talento hacia el descubrimiento y el desarrollo de las tecnologías apropiadas, un campo plagado de ingenio palabra que ha servido de fuente generatriz a esa disciplina del conocimiento.

VII. REFERENCIAS

- [1] FAO.(2011). Ahorrar para crecer. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/014/i2215s/i2215s.pdf>
- [2] FAO. (2010). El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo: La inseguridad alimentaria en crisis prolongadas. Roma. . Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/013/i1683s/i1683s.pdf>
- [3] Izquierdo, J y de la Riva, G.(2000). Plant biotechnology and food security in Latin America and the Caribbean. EJB Electronic Journal of Biotechnology, 3 (1) April
- [4] Naciones Unidas. (2009) World urbanization prospects, the 2009 revision population database. Disponible en: <http://esa.un.org/wup2009/unup/>
- [5] Rosegrant, M., Ringler, C. y Msangi, S.(2008). International model for policy analysis of agricultural commodities and trade (IMPACT): Model description. Washington, DC, IFPRI.
- [6] Bruinsma, J.(2009). The resource outlook to 2050: By how much do land, water and crop yields need to increase by 2050? Documento presentado en el Foro de Expertos de Alto Nivel de la FAO sobre cómo alimentar al mundo en 2050, 24–26 Roma, FAO
- [7] Convenio sobre la Diversidad Biológica.(1992). Disponible en: <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-es.pdf>
- [8] Sharry, S; Adema, M y Abedini, W. (2015) Plantas de probeta. Manual para la propagación de plantas por cultivo de tejidos in vitro. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de la Plata (Argentina). Fundación REDBIO Internacional
- [9] Garcia-Gonzalez, R., Quiroz, K., Carrasco, B. y Caligari, P. (2010), Plant tissue culture: Current status, opportunities and challenges. *Cienc. Inv. Agr. vol.37, n.3, pp. 5-30.*
- [10] Ahloowalia, B., y Savangikar, V. (2004) Incorporation of low cost options. In: International Atomic Energy Agency. Low cost options for tissue culture technology in developing countries. Viena, pags.: 41-45. *Proceedings of a Technical Meeting. FAO/IAEA.*
- [11] Oviedo de Cristaldo, R. (2014). Micropropagación. En: Conjunto de estudios de caso sobre Biotecnologías simples, sostenibles y de bajo costo para la agricultura familiar. Citado en la referencia [8].
- [12] Roberts S., Shuler M. (1997). Large-scale plant cell culture. *Curr Opin Biotechnol* 8: 154–159
- [13] Debnath, S., (2011) Bioreactors and molecular analysis in berry crop micropropagation—a review. *Can. J. Plant Sci.* , 91, 147– 157.
- [14] Gautheret, R. (1983). Plant tissue culture: a history. *Bot. Mag. Tokyo* 96: 393-410
- [15] Paek, K. , Chakrabarty D. , Hahn E. (2005). Application of bioreactor systems for large scale production of horticultural and medicinal plants. *Plant Cell Tiss Organ Cult* 81:287-300
- [16] Steingroewer, J., Bley, T., Georgiev, V., Ivanov, I. et al.,(2013) Bioprocessing of differentiated plant in vitro systems. *Eng. Life Sci.* 13, 26–38.
- [17] Etienne, H., Berthouly, M. (2002), Temporary immersion systems in plant micropropagation. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 69, 215–231.
- [18] Watt, M. (2012) The status of temporary immersion system (TIS) technology for plant micropropagation. *Afr. J. Biotechnol.* 11, 14025–14035.
- [19] Lyam, P. , Musa, M. L., Jamaledine, Z. , Okere, U. et al. (2012), The potential of temporary immersion bioreactors (TIBs) in meeting crop production demand in Nigeria. *J. Biol. Life Sci.* 3, 66–86.
- [20] Albarran, J., Bertrand, B., Lartaud, M., Etienne, H.(2005) Cycle characteristics in a temporary immersion bioreactor affect regeneration, morphology, water and mineral status of coffee (*Coffea arabica*) somatic embryos. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 81, 27–36.
- [21] Escalona, M., Lorenzo, J., Gonzalez, B., Daquinta, M. et al. (1999). Pineapple (*Ananas comosus* L. Merr) micropropagation in temporary immersion systems. *Plant Cell Rep.* 18, 743–748.
- [22] Weathers, P., Liu, C., Towler, M., Wyslouzil, B. (2008) Mist reactors: Principles, comparison of various systems, and case studies. *Electron. J. Integr. Biosci.* 3, 29–37.
- [23] Kamarainen-Karppinen, T., Virtanen, E., Rokka, V., Pirttila, A. (2010) , Novel bioreactor technology for mass propagation of potato microtubers. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 101, 245–249.
- [24] Liu, L., Li, S., Yu, K., Tang, H. et al. (2010), Rapid propagation of virus free sugarcane plantlets via temporary immersion bioreactor system. *Agric. Sci. Technol. Hunan* 11, 148–150
- [25] Cuello, J. , Yue, L. (2008), Ebb-and-Flow bioreactor regime and electrical elicitation: novel strategies for hairy root biochemical production. *Electron. J. Integr. Biosci.* 3, 45–56.
- [26] Mordocco, A., Brumbley, J., Lakshmanan, P. (2009), Development of a temporary immersion system (RITA) for mass production of sugarcane (*Saccharum* spp. interspecific hybrids). *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant* , 45, 450–457
- [27] Etienne, H., Berthouly, M.,(2002) Temporary immersion systems in plant micropropagation. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 69, 215–231.
- [28] Ducos, J. P., Terrier, B., Courtois, D., Petiard, V . (2008) Improvement of plastic-based disposable bioreactors for plant science needs. *Phytochem. Rev.* 7, 607–613.
- [29] Ashraf, M. , Aziz, M. , Stanslas, J., Kadir, M. (2013), Optimization of immersion frequency and medium substitution on microtuberization of *Chlorophytum borivilianum* in RITA system on production of saponins. *Process Biochem.* 48, 73–77
- [30] Albarran, J., Bertrand, B., Lartaud, M., Etienne, H.(2005), Cycle characteristics in a temporary immersion bioreactor affect regeneration, morphology, water and mineral status of coffee (*Coffea arabica*) somatic embryos. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 81, 27–36.
- [31] Adelberg, J., Toler, J. (2004) , Comparison of agar and an agitated, thin-film, liquid system for micropropagation of ornamental elephant ears. *HortScience*, 39, 1088–1092
- [32] Watt, M. (2012), The status of temporary immersion system (TIS) technology for plant micropropagation. *Afr. J. Biotechnol.* 11, 14025–14035.
- [33] Eibl, R., Eibl, D. (2008), Design of bioreactors suitable for plant cell and tissue cultures. *Phytochem. Rev.* 7, 593–598.
- [34] Eibl, R., Werner, S., Eibl, D (2009)., Disposable bioreactors for plant liquid cultures at Litre-scale. *Eng. Life Sci.* 9, 156–164.

Diseño y construcción de un sistema de inmersión temporal de bajo costo para la propagación *in vitro* de plantas bajo el enfoque de una tecnología apropiable

Rafael Muñiz

rmuniz53@gmail.com

Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería

Universidad Católica Andrés Bello

Recibido: 12 de junio de 2019

Aceptado: 11 de julio de 2019

Disponible online: 12 de julio de 2019

Resumen: El desarrollo sostenible del sector agrícola que propone la FAO como un medio para reducir el déficit de alimentos que enfrenta la humanidad, se define como el incremento de la producción a partir de la misma área de tierra, preservando el medio ambiente y contribuyendo al capital natural y al humano. El desarrollo de una biotecnología agrícola que sea apropiada y apropiable implica el diseño y la implementación de herramientas capaces de contribuir al desarrollo sostenible además de cumplir con otros requisitos tales como: ser técnicamente factibles dentro del nivel de desarrollo técnico-científico de una comunidad; proveer beneficios tangibles a los destinatarios; ser ambientalmente seguras, y social, económicamente y culturalmente aceptables. La propagación de tejidos vegetales *in vitro* permite multiplicar diversas especies y obtener material vegetal libre de agentes contaminantes sea del tipo químico como biológico. Sin embargo, los elevados costos que se generan, debido a los insumos, los equipos, la infraestructura necesaria y la necesidad de un personal especializado le han limitado el uso de este tipo de biotecnología a los pequeños productores. Los biorreactores ofrecen una alternativa viable que permite solventar varias de esas limitaciones. En particular los Sistemas de Inmersión Temporal (SIT) constituyen una de las alternativas más simples para fabricar biorreactores a bajo costo. El propósito de este trabajo es el de diseñar y construir un SIT de bajo costo con el objetivo de transferir esta tecnología desde el sector académico al productivo promoviendo su aplicación por los agricultores familiares.

Palabras clave: sistemas de inmersión temporal, propagación de plantas *in vitro*, tecnologías apropiadas, agricultura familiar.

Design and construction of a low cost temporary immersion system for *in vitro* plant propagation under the approach of appropriable technology

Abstract: The sustainable development of the agricultural sector proposed by FAO as a means to reduce the food deficit facing humanity is defined as the increase of production from the same area of land, preserving the environment and contributing to the capital natural and human. The development of an agricultural biotechnology that is appropriate and appropriable involves the design and implementation of tools capable of contributing to sustainable development in addition to meeting other requirements such as: being technically feasible within the level of

technical-scientific development of a community; provide tangible benefits to the recipients; be environmentally safe, and socially, economically and culturally acceptable. The propagation of plant tissues *in vitro* allows multiple species to multiply and obtain plant material free of contaminating agents, either chemical or biological. However, high costs generated due to inputs, equipment, necessary infrastructure and the need for specialized personnel have limited the use of this type of biotechnology to small producers. The bioreactors offer a viable alternative that allows to solve several of those limitations. In particular, the Temporary Immersion Systems (SIT) constitute one of the simplest alternatives to manufacture bioreactors at low cost. The purpose of this work is to design and build a low cost SIT with the objective of transferring this technology from the academic sector to the productive sector, promoting its application by family farmers.

Keywords: temporary immersion systems, propagation of *in vitro* plants, appropriate technologies, family farming.

I. INTRODUCCIÓN

En un contexto global, los sistemas actuales de producción y distribución de alimentos no han logrado alimentar de una forma eficiente a la población del planeta. Cerca del 75% de las personas más gravemente afectadas por las deficiencias en la alimentación viven en zonas rurales y sus medios de subsistencia dependen directa o indirectamente de la agricultura [1].

En los próximos años la intensificación de la producción agrícola será necesaria de manera particular en zonas de producción marginales que son las que presentan condiciones productivas menos fiables, con menor calidad del suelo, menor acceso al agua y climas menos favorables

La biotecnología se utiliza para resolver problemas en todos los aspectos de la producción agrícola: para elevar y estabilizar el rendimiento de los cultivos, mejorar la resistencia a las plagas, a condiciones abióticas adversas como la sequía y el frío, y

aumentar el contenido nutricional de los alimentos.

En los últimos años el desarrollo de las técnicas de propagación *in vitro* de tejidos vegetales ha tenido un gran impulso, debido a que aumenta la producción de material vegetal libre de patógenos, con mayor vigor y homogeneidad genética, lo que ha permitido incrementar la productividad de numerosos cultivos hortícolas, frutales, forestales y ornamentales de alto valor comercial [2].

Por otro lado se debe tomar en cuenta que también existen algunas limitaciones. Esta técnica presenta mayores costos de instalación y de mantenimiento que la propagación tradicional. Requiere de áreas de ambiente controlado y de equipos apropiados tales como autoclaves y cámaras de crecimiento además de un personal capacitado y emplea insumos que son costosos y muchas veces difíciles de conseguir en los países en vías de desarrollo. En relación al tema de los costos varios investigadores coinciden en que las principales causas de los altos costos de

producción son el elevado número de operaciones manuales y el uso de agentes gelificantes (agar) en los medios de cultivo como soportes de los explantes. Los costos de mano de obra en la micropropagación comercial han sido estimados en rangos que oscilan entre el 40 % y el 90 % del costo final de las plantas. La omisión del gelificante en el medio de cultivo definitivamente reduciría los costos de producción de las plantas y facilitaría el proceso de automatización de la micropropagación [3].

Por otra parte, el uso de medios de cultivo líquidos en las etapas de la micropropagación se considera otra ruta ideal para reducir los costos de producción del cultivo, además de permitir la automatización de la producción y con ello disminuir el importe de la mano de obra [4].

Estas limitaciones justifican el diseño de nuevas tecnologías que ofrezcan las ventajas de poder obtener un gran número de plantas en un tiempo y espacios relativamente reducidos y que cumplan también con otros tipo de requisitos como su simplicidad y su bajo costo. Los biorreactores constituyen una tecnología especializada, equipada y diseñada entre otros fines para el cultivo de tejidos vegetales.

El uso de biorreactores ofrece una serie de ventajas entre las que se pueden incluir: un aumento en el tamaño de las plántulas propagadas masivamente en lapsos de tiempo relativamente cortos, la reducción de los costos de manejo, simplifica las labores de inoculación y de la cosecha, no requiere del uso de muchos recipientes ni de una amplia área de trabajo; el contacto directo y

permanente de los explantes con el medio líquido puede favorecer su crecimiento; la aireación forzada incrementa la biomasa desplazando el crecimiento apical y estimulando el desarrollo de brotes laterales [5].

Existen diversos diseños de biorreactores que pueden ser utilizados para el cultivo de tejidos vegetales y la elección del diseño óptimo para una aplicación específica depende de un cierto número de parámetros. Algunos de los parámetros más importantes son: la transferencia de oxígeno, la eficiencia del mezclado, y que los niveles de la agitación en el sistema permanezcan a un nivel de estrés aceptable [6].

Los biorreactores para el cultivo in vitro de plantas se clasifican en base a dos criterios generales: según su sistema de agitación, que puede ser de tipo mecánico o neumático y también de acuerdo al tipo de proceso de inmersión que puede ser del tipo permanente o el de inmersión temporal.

Los Sistemas de Inmersión Temporal (SIT) son sistemas de cultivo periódicos basados en la alternancia de los ciclos de inmersión del material vegetal cultivado en el medio líquido seguido por el drenaje y la exposición del tejido a un entorno gaseoso [7].

Todos estos sistemas cumplen con una serie de condiciones entre las que se encuentran: evitar la inmersión continua del material vegetal en el medio de cultivo; proveer una adecuada transferencia de oxígeno; facilitar los cambios secuenciales y automatizados del medio de cultivo; reducir la contaminación microbiana y en general se busca que tengan

un costo menor a la de otros reactores convencionales.

En un trabajo previo de investigación de tipo documental realizado por el autor y publicado en fecha reciente en la Revista Tekhné [8] se evidencia el estado del arte de los Sistemas de Inmersión Temporal haciendo énfasis en los equipos que son de bajo costo. En el mismo artículo se detallan cuales deben ser las condiciones óptimas de operación de estos equipos. Como conclusión de este estudio previo se determinó que la opción más simple de construir con materiales ordinarios y la que tendría el menor costo sería el modelo de balancín. Esta decisión estuvo sustentada en una serie de criterios que se presentan a continuación [8]:

- Es uno de los diseños más simples entre los SIT ya que utilizan una plataforma mecánica para inclinar los recipientes de cultivo en un ángulo determinado, de modo que el medio se pueda trasladar de un extremo del recipiente al otro, y viceversa.
- Los recipientes de cultivo suelen ser fabricados con plástico transparente y tienen forma rectangular con una apertura, la cual es cerrada por una tapa de rosca que contiene un filtro en su interior. Al usar recipientes plásticos en sustitución del vidrio se reducen los costos en material y en el proceso de autoclavado de los recipientes.
- Permite acomodar un buen número de recipientes de cultivo en una misma bandeja para hacer pruebas con distintos medios de cultivo y/o diferentes especies de plantas en forma

simultánea bajo las mismas condiciones de temperatura, fotoperiodo y calidad e intensidad lumínica entre otros.

- No se requiere la conexión de otros dispositivos adicionales para proporcionar el suministro de aire al sistema ni de complejos sistemas de control utilizando electroválvulas, temporizadores digitales y otros dispositivos costosos.
- Aunque se requiere hacer una cierta inversión para construir un SIT de modelo balancín existen formas de reducir los costos de construcción y de consumo de energía siguiendo un enfoque de Tecnologías Apropriadas modificando los siguientes aspectos: simplificando el diseño, empleando materiales de bajo costo, mantener los cultivos bajo luz solar natural que posee mejor calidad lumínica y mayor intensidad que la luz fluorescente.

II. CRITERIOS DE DISEÑO PARA UN SIT DEL TIPO BASCULANTE

Para lograr el crecimiento y la multiplicación eficiente de los tejidos en los SIT es necesario controlar una serie de parámetros: la duración y frecuencia de las inmersiones, el suministro adecuado de nutrientes, una ventilación eficiente de los tejidos de la planta, usar un volumen adecuado de medio nutritivo y garantizar el contacto intermitente entre toda la superficie del tejido y el medio líquido [9].

Además de estas especificaciones que ya acotamos podemos incluir otras como criterios a tomar en cuenta para el diseño y construcción de un equipo que pueda cumplir

con las condiciones que lleven a resultados exitosos.

1. Las dimensiones y el peso del equipo deben ser adecuados para un área limitada (equivalente una mesa de comedor) y el equipo debe poder transportarse con facilidad y que sea fácil de armar y desarmar.
2. La bandeja del balancín acomode el mayor número de recipientes de cultivo lo que permite efectuar ensayos con diferentes medios de cultivo e incluso distintas especies vegetales en un mismo ciclo de experimentos bajo las mismas condiciones ambientales
3. Debe mantener un ángulo de oscilación alrededor de los 30° para garantizar que el medio migre completamente de un extremo a otro del recipiente durante los ciclos de inmersión y de secado
4. El sistema de propulsión mecánico de utilizar un motor de bajas rpm o en su defecto se requiere de un reóstato que permita su graduación de forma que el movimiento de giro sea lento y su traducción al movimiento oscilante no se realice de forma abrupta.
5. Los envases para el cultivo deben ser reciclables, traslúcidos y deben soportar tratamientos de sanitización química que permitan controlar a un mínimo la población de microorganismos.
6. Los recipientes de cultivo deben contar con una tapa de cierre efectivo y deben tener acceso a la atmósfera a través de un sistema de filtros.
7. Se debe contar con un temporizador o en su defecto el poder disponer de un sistema en el que sea posible fijar en el curso del día y de

la noche las horas donde se debe activar el ciclo de inmersión

8. Acoplado al temporizador debe operar un circuito que controle el número de ciclos de inmersión que seguirá el sistema a una hora prefijada y el tiempo que permanecerá en movimiento el balancín. Este parámetro es importante para airear el material vegetal al moverse el frente del solvente dentro del envase. Este circuito debe garantizar que la bandeja permanezca siempre en la posición de no hidratación hasta que inicie el siguiente ciclo

III. OBJETIVOS

- Diseñar un Sistema de Inmersión Temporal de tipo basculante con materiales que por su simplicidad y su bajo costo se encuentren al alcance de las comunidades de bajos recursos y que pueda cumplir con los criterios de diseño que se especifican en el punto 2 del trabajo.
- Fabricar un prototipo de SIT que pueda constituirse en una tecnología apropiada y apropiable por los pequeños agricultores.
- Evaluar los resultados preliminares del funcionamiento físico con el prototipo y establecer las modificaciones que se deberían realizar en el equipo de forma de mejorar su eficiencia y el funcionamiento posterior del sistema.

IV. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SIT BASCULAR

La construcción del prototipo del SIT bascular y las pruebas efectuadas a ese dispositivo se realizaron en un local de la UCAB que fue adaptado como laboratorio donde se contaba con muy pocos recursos, tratando de emular, lo más cercano que fuera posible, las condiciones de que podría disponer un agricultor en su ambiente normal de desempeño.

A. Diseño y construcción del balancín

Los insumos que se utilizaron para la fabricación del sistema mecánico del balancín en su mayor parte fueron de madera y se obtuvieron a partir de materiales de desecho y de equipos que fueron desincorporados de otros laboratorios y dependencias de la universidad

El sistema de balancín, como se muestra en la Figura 1 se construyó a partir de dos gavetas idénticas de madera (60 cm de largo, 44 de ancho, 10 cm de altura y 20 mm de espesor). La gaveta que se colocó en la parte superior del equipo es la que realizará el movimiento oscilante y servirá también como bandeja contenedora para los recipientes de cultivo donde se colocará el material vegetal. Una de las bondades principales de este tipo de diseño es que es posible ubicar nueve recipientes en la gaveta superior. La segunda gaveta sirve como base de sostén para darle estabilidad al equipo. Ver también Figura 2 y 3.

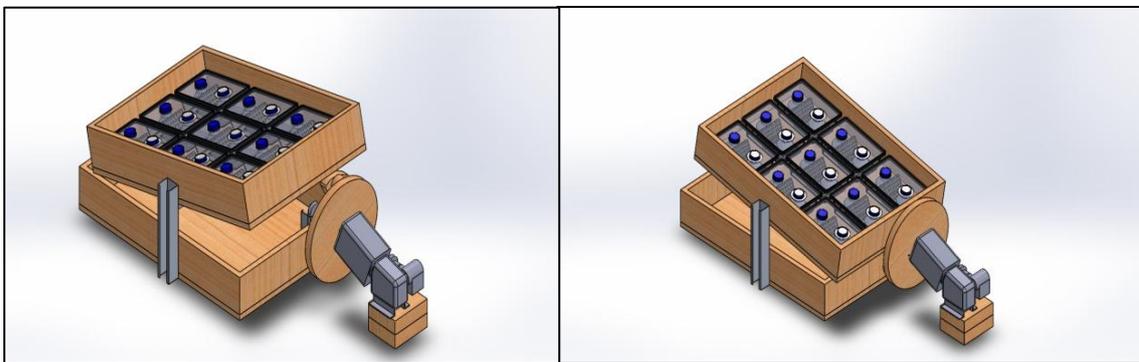


Figura 1: Posiciones de inmersión y de secado en el SIT de tipo balancín. Esquemas copiados a partir del programa Solid Work®, versión 2010



Figura 2: Posición de la gaveta del balancín, fase de inmersión



Figura 3: Posición de la gaveta del balancín, fase de secado



Figura 4: Detalle del montaje de los tubos que permiten el giro de la gaveta superior del balancín. El tubo interno de 46 cm de largo, 2.5 cm de diámetro externo y un espesor de 1 mm se introduce en un segundo tubo de: 40 cm de largo, 4 cm de diámetro externo y un espesor de 2 mm. El tubo externo sujeta la gaveta superior con tornillos

Para soportar la gaveta superior y al mismo tiempo permitir su giro se colocaron dos soportes metálicos en la posición media entre las dos gavetas, los soportes se construyeron con material de desecho de paneles de aglomerado para oficinas.

Para permitir la oscilación de la gaveta superior los dos perfiles fueron perforados en su extremo superior con el propósito de introducir a través de ellos dos tubos concéntricos, uno de menor diámetro, que sirven como eje de rotación. Los dos tubos se obtuvieron a partir de restos de material de plomería y de los tubos que se emplean en las instalaciones eléctricas. Se pueden ver los detalles del montaje del eje doble y sus dimensiones en la Figura 4.

La forma de propulsión que permitió el desplazamiento de la gaveta superior se logró mediante el uso de un motor de corriente alterna Tubingen de 50 w y de velocidad variable entre 2 y 20 rpm. Un botón externo conectado a un engranaje ligado internamente al motor permitió graduar el movimiento angular.

Este motor formaba parte de una bomba peristáltica y fue donado por el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la UCAB, el equipo se modificó eliminando el cabezal que cumplía con sus funciones originales, conservando el motor que debido a sus bajas revoluciones por minuto permitió que el dispositivo oscilara sin esfuerzo a muy bajas revoluciones por minuto (5 -7 rpm)., con las que se operó el sistema bascular.

La conversión del movimiento de giro entre el eje del motor y la gaveta superior de forma de poder aplicar en esta un movimiento de tipo oscilante con sentido vertical según requiere la operación del balancín se logró acoplando la salida del motor mediante un eje metálico (50 cm de largo y 1 cm de diámetro) que se introdujo a través de un disco de madera (25 cm de diámetro y 2 cm de espesor) que se desplazará con el giro del motor.

En la Figura 5 se muestra el diseño del dispositivo de conversión (disco de madera) en la que se puede notar que sobre la superficie frontal del disco y en dirección a la gaveta se fijó mediante dos espaciadores de madera circulares (4 cm de diámetro y 2 cm de espesor) una segunda pieza fabricada con el mismo material del disco que tiene una forma semicircular (14 cm de diámetro máximo 7 cm del centro al borde y 2 cm de espesor).

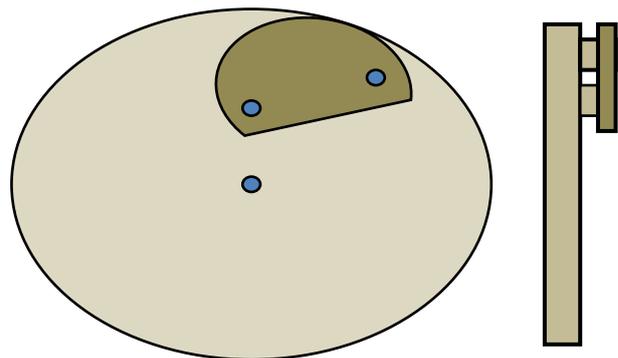


Figura 5: Diseño del dispositivo de conversión (disco de madera) que transmite el movimiento de giro del motor a la gaveta superior del balancín.

Fuente: Elaboración propia.

Esta pieza fue colocada en una posición excéntrica sobre el disco mayor y fue el punto de contacto con el borde de la gaveta

superior, logrando de esta forma el movimiento requerido. Podrá notar otros detalles de este dispositivo en la Figura 6.



Figura 6: Montaje del disco de madera que transmite el movimiento desde el motor a la gaveta superior del balancín. Observe la posición de la pieza de madera semicircular en posición excéntrica colocada al frente del disco.

Este sistema de transmisión del movimiento se construyó en base a los requerimientos del ángulo de giro que debe alcanzar la gaveta superior y a las propias dimensiones del dispositivo.

Una vez que se pudo contar con todos los materiales y una primera versión del prototipo del balancín se procedió a realizar una simulación del movimiento oscilante del equipo utilizando el programa Solid Work[®], versión 2010. de licencia estudiantil con el propósito de efectuar los ajustes al diseño. Las simulaciones permitieron hacer modificaciones básicamente en la altura de los soportes de la gaveta superior, en la posición de los ejes de giro y en las medidas y la geometría del disco de madera que traduce el movimiento de giro del motor a uno

de tipo oscilante. El simulador además permite evaluar el movimiento del balancín a distintos valores de rpm en el motor.

B. Modificación de un envase plástico para adaptarlo como recipiente para la propagación in vitro de plantas

Otro de los aspectos fundamentales que se deben tomar en cuenta en el diseño del Sistema de Inmersión Temporal de tipo basculante se relaciona con la clase de recipiente que se utilizará en los ensayos como receptáculo para contener los explantes y el medio de cultivo.

A tal efecto se emplearon envases plásticos de forma rectangular con una geometría ligeramente piramidal (del tipo de los que se utilizan para calentar la comida en el microondas) estos envases son fabricados de PVC y cuentan con una tapa de buen sellado lo que previene la pérdida del liquido durante el proceso aunque este tipo de tapa no es hermética.

Las dimensiones del recipiente son de 12 cm x 17 cm en su extremo rectangular superior y de 15 cm x 9 cm en el rectángulo de la base, su altura es de 6 cm. Estas medidas le permiten al envase disponer de una capacidad operativa de hasta 100 ml del medio de cultivo. [10] Este volumen fue estimado en condiciones de operación garantizando que se cubriera en forma suficiente el compartimiento del envase en la fase de inmersión y que el líquido al retornar con el movimiento de balancín permaneciera seco el otro compartimiento durante la etapa de no hidratación.

Como se muestra en la Figura 7 se añadió al envase original una rejilla plástica (9 cm x 12 cm) que se puede doblar con mucha facilidad sin llegar al quiebre y que se coloca

en el interior del envase como separador. La función de esta rejilla es establecer dos compartimientos permitiendo a su vez el flujo del medio entre las dos posiciones

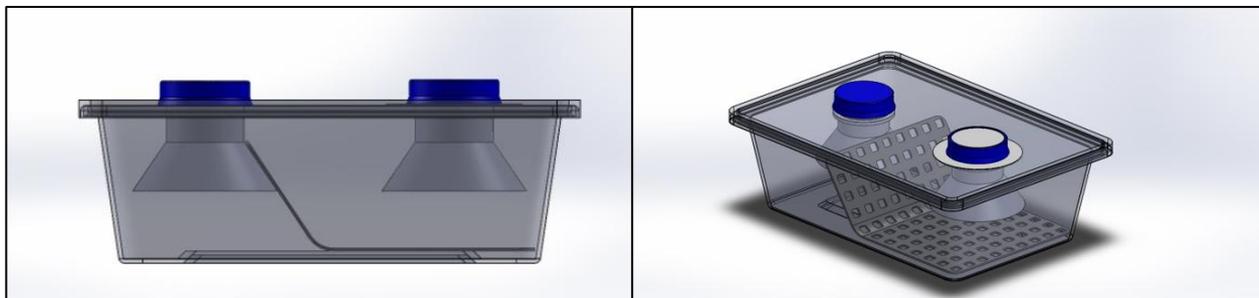


Figura 7: Diseño de los recipientes de inmersión temporal para la propagación *in vitro* de plantas.
Fuente: programa Solid Work®, versión 2010

Este tipo de rejilla fue obtenida a partir de fuentes comerciales (ferretería) y cuenta con orificios de 5 mm^2 , la rejilla se mantiene en su posición doblada sujeta por la boca de una botella de refresco estándar comercial de 600 ml. Según se evidencia en la Figura 7 en la tapa del recipiente se hicieron dos perforaciones ajustando en cada una el segmento cónico que permaneció al cortar el extremo superior de una botella de agua comercial (600 ml) a una distancia de la tapa de 4 cm.

En la Figura 6 se muestran varios detalles de las modificaciones efectuadas al recipiente para adaptarlo al cultivo de los explantes vegetales. Como indicamos antes la forma cónica de la tapa de refresco sirve como un retén para el borde de la rejilla fijando ésta en una posición próxima al punto medio del envase.

En una de las tapas se colocó en el interior a modo de filtro una capa de gasa estéril y debajo de esta capa otra de algodón estéril

(obtenidos en las farmacias locales). Esto se hizo con el propósito de airear el material vegetal durante el proceso y al mismo tiempo prevenir la contaminación desde el exterior. Esta tapa de refresco se perforó hasta unos 3 mm del borde para que pudiera retener dos capas de filtros al ser enroscada sobre la boquilla de la botella. Al hacer las perforaciones en la tapa del recipiente se hicieron justo a la medida del cuello de la botella de refresco que se introduce a presión. Las dos tapas se fijaron a la tapa del envase plástico y se sellaron en el borde con una pistola de silicona por la cara externa de la tapa del recipiente de cultivo con una pistola de silicona. Las dos tapas se colocaron a una distancia de 9 cm. En relación a sus puntos medios.

La segunda tapa de refresco no fue perforada y cumple con el propósito de mantener una vía de acceso para introducir el material vegetal sin tener que abrir la tapa del recipiente de cultivo y también poder efectuar el cambio

periódico del medio de cultivo. La frecuencia de reemplazo del medio varía según sean los requerimientos del tipo de material vegetal que se quiere propagar pero se acostumbra que

se haga con una frecuencia semanal de forma de renovar el aporte de los nutrientes al tejido vegetal [10].



Figura 8: Modificaciones del recipiente para la propagación del material vegetal. Las esferas amarillas en la foto superior izquierda simulan las dimensiones promedio de los explantes de tejido vegetal

Se recomienda esterilizar previamente el medio de cultivo siguiendo el procedimiento convencional de autoclave en olla de presión y efectuar los cambios periódicos de medio en un ambiente limpio trasegando con una inyectora plástica estéril de las que se pueden adquirir en las farmacias.

De forma de controlar los niveles de contaminación del aire en el local se recomienda el uso de un acuario convencional como sustituto de un flujo laminar donde se coloquen mecheros de alcohol una práctica que se ha llevado a cabo con resultados en otras experiencias de adaptar los procedimientos de propagación in vitro de plantas a condiciones de campo y con equipos de bajo costo [11].

C. Dispositivo para programar las horas en las que se aplican los ciclos de inmersión

En los Sistemas de Inmersión Temporal es necesario fijar previamente las horas durante el período circadiano en las cuales se aplicarán los ciclos de inmersión del material vegetal que se quiere propagar.

Con frecuencia se establecen entre cuatro y cinco ciclos durante el período diurno y de dos a tres ciclos en el nocturno esto se debe a la variación de la temperatura entre el día y la noche y la evaporación de la película de medio que permanece cubriendo los explantes durante el período de exposición al sol. Para llevar a cabo el control de estos ciclos, en otras palabras las horas en las cuales se debe activar el motor para efectuar la oscilación se utiliza frecuentemente un temporizador comercial ya sea del tipo analógico o digital [12].

En este caso no se disponía de un equipo temporizador, sin embargo siguiendo el enfoque de trabajar con lo que se tiene a la

disposición que recomiendan las Tecnologías Apropriadas se decidió modificar y adaptar un reloj despertador del tipo de los modelos clásicos de operación mecánica (operados por cuerda).

El propósito fue transformarlo en un dispositivo capaz de accionar la señal eléctrica que activaría el giro del motor logrando así el desplazamiento del disco de madera que ya detallamos en la Figura 2 y 4.

La Figura 9 muestra la serie de modificaciones que se efectuaron al reloj despertador para que pudiese funcionar como un temporizador. En los dibujos que se colocan a la izquierda de la Figura 4 se muestra el reverso del reloj (izquierda – inferior) y la apariencia frontal del dispositivo que se utilizó (izquierda – superior).

Una de las modificaciones que se efectuaron al reloj fue la de transformar su aguja horaria en un sensor eléctrico que al establecer contacto en un circuito le diera la señal de prendido y de apagado al sistema.

Para que se hiciera el contacto necesario y la transmisión de la señal fuera posible se modificó la aguja del reloj adaptándole un cabezal en forma de horquilla y además

sobre el cuerpo de la aguja se enrolló un hilo de cobre muy fino que actuaría como un inducido..

Se diseñó un sistema de control para que se acoplara con el movimiento de la aguja del reloj. Este dispositivo se construyó sobre una placa de madera a la que se hicieron perforaciones muy finas siguiendo un patrón en forma de dos círculos concéntricos. Este tipo de disposición permitió establecer el contacto eléctrico a las horas prefijadas y también establecer la conexión con el circuito electrónico de control de la inmersión que explicaremos más adelante. Para fijar los tiempos se emplearon sujetadores de papel tipo “clips” de oficina que cumplen funciones equivalentes a los botones que seleccionan las horas de los eventos en los temporizadores comerciales de tipo mecánico.

En la Figura 10 se pueden ver los detalles del reloj que se utilizó, notará que se colocaron dos tornillos largos que permitirán su conexión con el dispositivo temporizador que se describirá más adelante. Podrá el lector ver los detalles observe la aguja del reloj que fue modificada como conductor eléctrico.

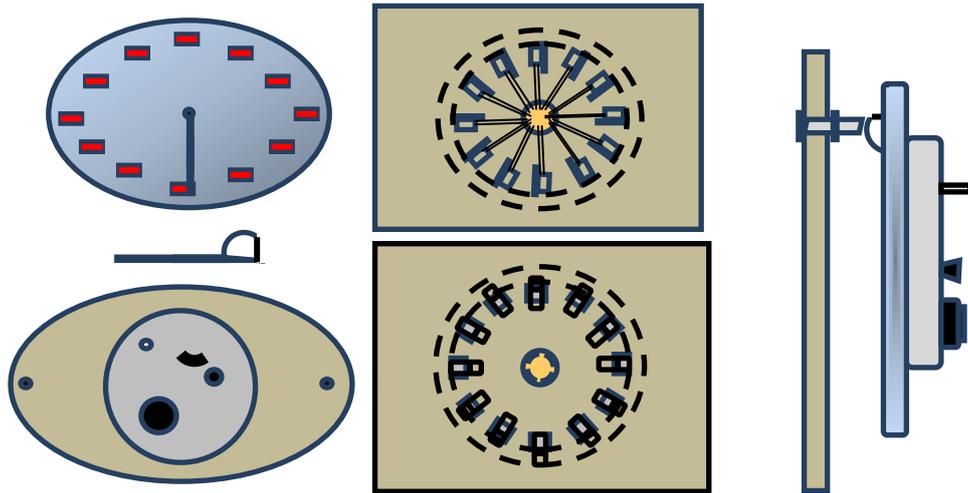


Figura 9: Detalles de diseño para la transformación de un reloj despertador de tipo mecánico en un temporizador. Izquierda. reloj-despertador con su cara frontal y la posterior y en medio la aguja de contacto. Centro: sistema de control de tiempo, Arriba la placa con los puntos de contacto con la aguja horaria del reloj. Abajo el reverso de esa placa con los clips que fijan las horas. Derecha: detalle lateral donde se muestra el contacto de la aguja del reloj con la placa que tiene los contactos **Fuente:** Elaboración propia



Figura 10: Vista frontal del reloj despertador que se adaptó como temporizador. Los tornillos permiten fijarlo al sistema temporizador. Note el detalle de la aguja del reloj que fue modificada para hacer el contacto con el dispositivo que transmitirá la señal a cada tiempo prefijado



Figura 11: Cara posterior del mismo dispositivo temporizador que se detalla en la Figura 4 donde se muestran como están fijados los clips

En la Figura 11 se muestra el diseño del sistema que permite seleccionar mediante el movimiento de los clips cuales serán las horas establecidas para los ciclos de inmersión. En el esquema superior a la derecha de la Figura 9 se muestra la cara frontal del dispositivo temporizador. Esta cara es la que estará en contacto con la aguja del reloj. Los puntos de contacto se ubicaron frente los 24 puntos horarios que marca el reloj.

Estas piezas de contacto con la aguja se construyeron soldando pequeños fragmentos rectangulares de láminas finas de acero que fueron recortadas a la medida a partir de hojillas de afeitar.

Se efectuaron pruebas con otros materiales conductores pero las hojillas por su resistencia a la deformación y su flexibilidad y su excelente conducción eléctrica permitieron transmitir la salida de la señal a la hora prefijada según la posición en que se prefijó el clip en la cara posterior del dispositivo.

Todos los puntos de contacto correspondientes a los puntos horarios del reloj están conectados a una placa colectora central fabricado a partir de una tapa perforada como se puede percibir en el centro de la Figura 9 y en la Figura 12.



Figura 12: Detalles del montaje del sistema que da la señal en contacto con la aguja del reloj que fue transformado en un temporizador

D. Circuito que controla los ciclos de inmersión y la posición de la gaveta superior en el balancín

Como mencionamos el reloj que fue adaptado como temporizador solo permite fijar las horas en las que se debe activar el motor para iniciar el ciclo de oscilaciones. Solo con fijar las horas no es suficiente por lo que se precisó diseñar también un circuito

electrónico que actúe en forma complementaria y que permita controlar otros dos parámetros que son necesarios:

- El número de veces que oscilará la bandeja en el balancín a cada uno de los tiempos del tratamiento. Este aspecto es importante porque las oscilaciones permiten no solo que se impregne el material vegetal con el medio de cultivo si

no también logra que mediante el movimiento oscilante que se genera se pueda airear el medio de cultivo intercambiando aire con el exterior a través del filtro que fue colocado en una de las tapas en el recipiente de cultivo.

- Por otra parte se debe tomar la precaución de que pueda ocurrir uno de los riesgos que podrían llevar al fracaso del prototipo y es que la bandeja permanezca en una posición que es errónea al finalizar un ciclo, por ejemplo que esta se mantenga por horas en estado de hidratación lo que involucra la muerte del material biológico por efecto de la vitrificación o que el tiempo de permanencia en el ciclo de secado se prolongue demasiado y se deshidrate el tejido.

Para resolver este tipo de problemas se diseñó un circuito de control tratando de utilizar un mínimo de componentes electrónicos, los que a su vez fueron seleccionados en base tanto a su bajo costo como a su posible adquisición en el mercado local. El desarrollo del circuito de control de los ciclos de inmersión se probó en una Placa de Pruebas (Protoboard) contando con los componentes electrónicos disponibles en los Laboratorios de Telemática de la UCAB.

En la Figura 5 se muestra el diseño del circuito para controlar los tiempos de inmersión y las posiciones en que va a reposar la bandeja del sistema de balancín en

un momento determinado. A grandes rasgos el circuito consta de una serie de componentes electrónicos (14 transistores, 4 capacitores, un condensador y múltiples resistencias).

En la Figura 13 se resalta dentro de los recuadros en línea roja los módulos que lo integran. Al desplazarnos en el circuito en el sentido vertical en la dirección de arriba hacia abajo podemos observar en la posición superior media los puntos de ingreso para la señal que proviene del temporizador y a la derecha superior hay un sistema de relé que se conectará con el motor que mueve la gaveta superior del balancín.

A la derecha se colocan los componentes de lo que se denomina la compuerta para controlar los lapsos en el tiempo de espera entre dos eventos consecutivos, inmersión (hidratación) y de la fase de secado

Esta compuerta de tiempo de espera está conectada con dos sistemas de memoria. Uno de estos sistemas controla el punto superior de oscilación y el otro la posición inferior.

Para marcar las señales de los dos eventos en el dispositivo se colocó una armazón externa de madera y en su interior se ubicaron dos resortes que sirven como sensores y hacen contacto en un punto prefijado con un tornillo en la gaveta superior.

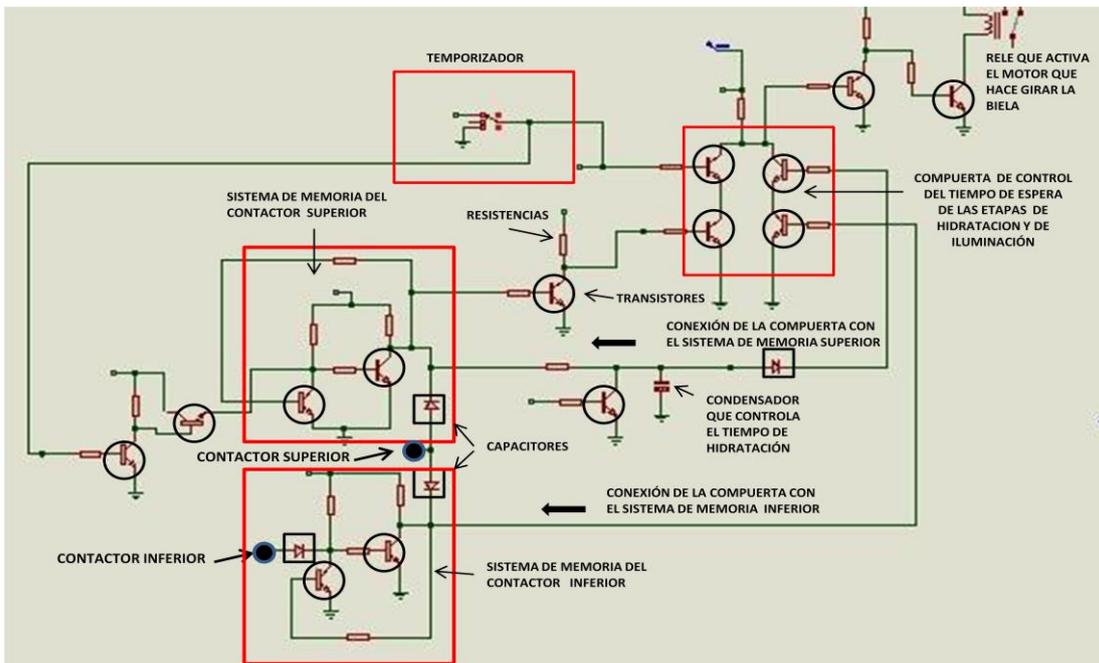


Figura 13: Diseño del circuito que controla los ciclos de inmersión. **Fuente:** Programa de diseño de circuitos: Proteus®, Professional versión 8.6

El tornillo ubicado sobre la gaveta superior del balancín establece el contacto con estos dos puntos a medida que oscila dando la señal respectiva hasta que los tiempos que han sido fijados previamente en las memorias del circuito y cierran el proceso

quedando la bandeja siempre en la posición de no hidratación sea durante el período diurno o el nocturno. Todo el ciclo reinicia cuando el reloj temporizador vuelve a dar la señal y el circuito se activa de nuevo (Ver la Figura 14).



Figura 14: Detalle de la ubicación de los dos elementos de contacto que darán la señal cuando la gaveta superior del balancín alcance su posición máxima y la mínima



Figura 15: Placa de Pruebas (Protoboard) que se empleó para el montaje del circuito de control de los ciclos de inmersión

El circuito fue montado y probado sobre una Placa de Pruebas (Protoboard) comprobando su correcto funcionamiento (Ver la Figura 15). En la Figura 16 se muestra el montaje de todos los componentes ya integrados en la estructura final del SIT del modelo basculante que fue diseñado y construido en este trabajo. En ella se resaltan algunos detalles que vale la pena destacar, se resalta la ubicación del disco de madera y la pieza excéntrica en su posición de oscilación máxima manteniendo la gaveta superior en la fase de no hidratación del material vegetal.

En la vista lateral se representa el eje que conecta el disco de madera con el motor. En la gaveta superior se representa la posición en que se colocó un tornillo que hará el contacto con las posiciones máximas y mínimas.

En el lateral de la gaveta inferior se representa el reloj temporizador que fue modificado en este trabajo y el circuito impreso que llevará el control de los ciclos de inmersión. El lector podrá ver estos y otros detalles en la Figura 17.

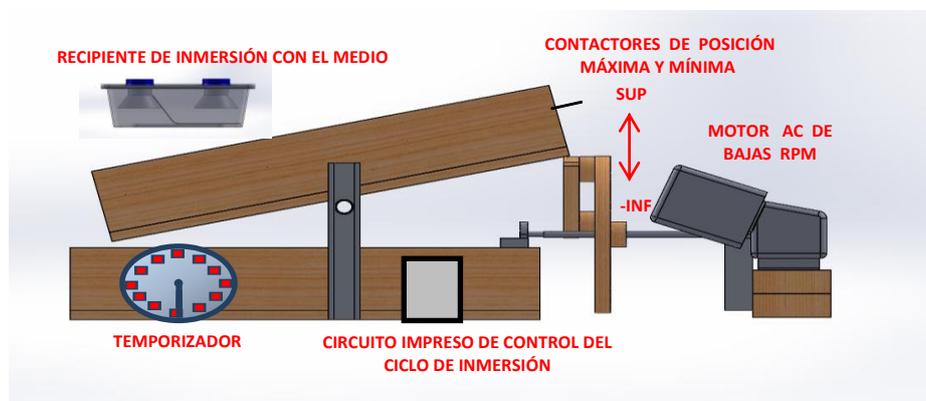


Figura 16: Montaje completo del Sistema de Inmersión Temporal de tipo basculín para la propagación *in vitro* de plantas. Fuente: adaptado por el autor a partir del programa Solid Work - 2010. Ver otros detalles en la Figura 17



Figura 17: Montaje completo del prototipo del Sistema de Inmersión Temporal de tipo balancín circuito para la propagación *in vitro* de plantas que se diseñó y construyó como objetivo de este trabajo

V. CONCLUSIONES

En este trabajo fue posible construir un prototipo de prueba de un Sistema de Inmersión Temporal para la propagación *in vitro* de plantas utilizando materiales de desecho.

Los parámetros con los que cumple el equipo corresponden con las especificaciones de diseño que se colocaron en el punto 2 del trabajo y además el diseño es fácil de modificar utilizando básicamente los mismo componentes lo que le confiere al equipo flexibilidad en base a los requerimientos que presenta de cada tipo de cultivo sin tener que llegar a rediseñar todo el equipo.

El hecho de poder colocar en una misma bandeja este número de envases le confiere ventajas a este tipo de dispositivo frente a otros que requieren del uso de parejas de recipientes colocados en cámaras de crecimiento bajo un régimen de iluminación con luz fluorescente y con sistemas de propulsión de aire comprimido controlados por electroválvulas y programados computacionales mucho más complejos que nuestro circuito y a todas luces fuera del alcance del usuario final como es el caso de los dispositivos RITA y los I sistemas de frascos gemelos [13].

VI. RECOMENDACIONES

- El uso de una Placa de Pruebas (Protoboard) para operar el equipo limita las posibilidades para que lo pueda copiar el usuario final de esta tecnología. Una alternativa viable es la de copiar el circuito en una versión más práctica del tipo de un circuito impreso sencillo y que esta se le pueda proporcionar al usuario.
- Para el montaje del sistema de balancín se utilizó como propulsor mecánico el motor de una bomba peristáltica de laboratorio. Ese dispositivo aparte de que fue una donación fue muy ventajoso por su posibilidad para regular la velocidad angular a pocas rpm y opera conectado a una línea de corriente alterna. Se deben investigar otras alternativas para el posible uso de otro tipo de motor (electrodomésticos) o mejor todavía probar con algún motor que utilizan los vehículos que sea de corriente continua y que se pueda operar con una batería de carro recargable de 12 V.
- Se requiere realizar pruebas microbiológicas tendientes a evaluar los niveles de contaminación que pueden presentar los cultivos cuando se añade algún medio nutritivo previamente esterilizado. Pudimos constatar que este tipo de recipientes se deforman

considerablemente cuando se les somete al autoclavado pero logran soportar sin mayores deformaciones la adición de líquidos con temperaturas que incluso superan los 60° C. La condición de sellado de los recipientes plásticos para el cultivo se puede mejorar recubriéndolos con Envoplast.

- Una de las formas que se sugiere para poder reducir los niveles de la contaminación de partida de estos recipientes es la de aplicar tratamientos de tipo químico del envase lavándolo con alcohol, agua oxigenada y con solución de hiposulfito de sodio al 10% que es un agente antimicótico. La prioridad en este caso es la de prevenir sobre todo la contaminación con hongos cuyo efecto perjudicial tiene más relación con que el hecho de que consumen el medio nutritivo por un efecto de competencia que con el daño directo sobre el tejido a causa de la infección.
- Otro aspecto que también queda pendiente es probar la posible sustitución de los medios nutritivos convencionales por otros medios líquidos provenientes de fuentes naturales como podría ser el agua de coco, extractos de zábila y jugo de tomate de árbol que le pueden proporcionar nutrientes de diversa índole a los cultivos [14].

RECONOCIMIENTOS

Debo expresar un justo y merecido reconocimiento a dos profesionales que me acompañaron, asesoraron y asistieron en el desarrollo de este proyecto. Al Ingeniero Javier Freitas por su apoyo con el manejo de las simulaciones con el programa Solid Work y sus valiosos consejos como ingeniero mecánico sobre una serie de aspectos del funcionamiento del balancín. Al TSU César Criollo cuyos conocimientos de electrónica hicieron posible el diseño y la puesta a punto del circuito de control. Aparte César por su impresionante habilidad manual y su visión

para traducir mis ideas en dispositivos prácticos a partir de materiales de desecho, él me demostró que las Tecnologías Apropriadas y Apropiables son proyectos factibles.

REFERENCIAS

- [1] FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en : <http://www.fao.org/3/19549ES/i9549es.pdf>
- [2] FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2013) Material de propagación de calidad declarada. Protocolos y normas para cultivos propagados vegetativamente. Estudio FAO de producción y protección vegetal 195
- [3] Martín ,M y Rodríguez ,E (2002) . El costo de producción en procesos de micropropagación para biofábricas de múltiples cultivos. Facultad de Ciencias Empresariales. Universidad Central de Las Villas. Cuba. Disponible en: eco.unne.edu.ar/contabilidad/costos/VIIIcongreso/308.doc
- [4] Valdés, Y (2012) Diagnóstico de los costos en el Instituto de Biotecnología de las Plantas. Tesis en opción al título de licenciado en Contabilidad y Finanzas .Universidad Marta Abreu de Las Villas. Cuba.
- [5] Solórzano R (2016). Diseño y construcción de un sistema de birreactores de inmersión temporal neumática para la multiplicación de Ananas comosus : Tesis de grado de Maestría en Ciencias Mención Biotecnología Agroindustrial y Ambiental . Universidad Nacional de Trujillo Perú.
- [6] Kamarainen-Karppinen, T., Virtanen, E., Rokka, V., Pirttila, A. (2010), Novel bioreactor technology for mass propagation of potato microtubers. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 101, 245–249
- [7] Watt, M. (2012) The status of temporary immersion system (TIS) technology for plant micropropagation. *Afr. J. Biotechnol.* 11, 14025–14035
- [8] Muñiz, R (2018) La propagación *in vitro* de plantas con Sistemas de Inmersión Temporal. Una Tecnología Apropiaada para la agricultura sustentable. *Tekhne*, Vol 21, número 3 p 43-50
- [9] Ducos, J. P., Terrier, B., Courtois, D., Petiard, V . (2008) Improvement of plastic-based disposable bioreactors for plant science needs. *Phytochem. Rev.* 7, 607–613.
- [10] Adelberg, J., Toler, J. (2004), Comparison of agar and an agitated, thin-film, liquid system for micropropagation of ornamental elephant ears. *HortScience*, 39, 1088–1092
- [11] Sharry, S; Adema, M y Abedini, W. (2015) Plantas de probeta. Manual para la propagación de plantas por cultivo de tejidos *in vitro*. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de la Plata (Argentina). Fundación REDBIO Internacional
- [12] Garcia-Gonzalez, R., Quiroz, K., Carrasco, B. y Caligari, P. (2010), Plant tissue culture: Current status, opportunities and challenges. *Cienc. Inv. Agr.* vol.37, n.3, pp. 5-30.

- [13] Weathers, P., Liu, C., Towler, M., Wyslouzil, B. (2008) Mist reactors: Principles, comparison of various systems, and case studies. *Electron. J. Integr. Biosci.* 3, 29–37.
- [14] Menezes L, Machado M Ballesta P Mora F Milaneze M y Mangolín A (2016) Suplementos orgánicos para el cultivo *in vitro* del híbrido *Laeliocattleya* (Orchidaceae) Volumen 34, N° 1. Páginas 47-54 IDESIA (Chile) Enero-Febrero, 2016 Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292016000100006>



BIOMIMÉTICA

HERRAMIENTAS DE DISEÑO INSPIRADAS EN LA NATURALEZA

Rafael Muñíz

rmuniz53@gmail.com

Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería (CIDI). Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, Venezuela.

Historia del Artículo

Recibido 15 de Septiembre de 2017

Aceptado 15 de Septiembre de 2017

Disponible online: 19 de Septiembre de 2017

Resumen: La biomimética (de bios, vida, y mimesis, imitar) es una nueva ciencia basada en el estudio de modelos, sistemas y procesos de la naturaleza con el propósito de imitarlos y así plantear posibles soluciones a problemas de orden práctico para cubrir algunas de las necesidades humanas. La biomimética, es un método por medio del cual los diseñadores e ingenieros se basan en el conocimiento de cómo los organismos resuelven ciertos problemas complejos en su relación con el entorno a lo largo de un proceso evolutivo de miles de millones de años. Con este propósito científicos de diversas áreas del conocimiento han iniciado el desarrollo de múltiples proyectos orientados a emular los procesos naturales introduciendo una serie de conceptos nuevos que hoy en día son empleados por organizaciones a nivel mundial en la construcción de bienes y servicios. Los métodos de diseño actuales requieren de nuevos enfoques para generar innovación. Los enfoques metodológicos que se presentan en este artículo facilitan la conceptualización de las estrategias de diseño de productos, basándose en las especificaciones funcionales que aportan los seres vivos.

Palabras Clave: Biomimética, biónica, bioingeniería, métodos de diseño, innovación.

Biomimetics Design tools inspired by nature

Abstract: Biomimetics (of bios, life, and mimesis, imitate) is a new science based on the study of models, systems and processes of nature with the purpose of imitating them and thus pose possible solutions to practical problems to cover some of the human needs. Biomimetics is a method by which designers and engineers build on the knowledge of how organisms solve complex problems in their relationship with the environment throughout an evolutionary process of billions of years. To this end, scientists from different areas of knowledge have started the development of multiple projects aimed at emulating natural processes by introducing a series of new concepts that today are used by organizations worldwide in the construction of goods and services. Current design methods require new approaches to generate innovation. The methodological approaches presented in this article facilitate the conceptualization of product design strategies, based on the functional specifications provided by living beings.

Keywords: Biomimetics, bionics, bioengineering, design methods, innovation.

I. INTRODUCCIÓN

“La naturaleza no hace nada superfluo, nada inútil, y sabe sacar múltiples efectos de una sola causa”.

Nicolás Copérnico (1473 - 1543)

La humanidad ha alcanzado un punto crítico en su evolución. El incremento a una tasa exponencial de la población, el consumo excesivo de los recursos no renovables, la acumulación de desechos muchos de ellos tóxicos y la desigualdad en la distribución de esos recursos entre países y en las comunidades que los constituyen, sumado a nuestros hábitos, que no son sustentables nos han llevado un nivel límite de tolerancia de la naturaleza.

La sustentabilidad es un proceso dinámico que podría permitir que los individuos desarrollen todo su potencial evolutivo, mejorando la calidad de vida mediante conductas que preserven los sistemas que soportan la vida en la Tierra.

Por medio de la evolución, los sistemas biológicos han experimentado diversos tipos de soluciones ante los desafíos que implican la supervivencia de las especies. La naturaleza en forma continua realiza experimentos donde se evidencia la presencia de elementos distintivos propios de la física, la química, la mecánica, la ciencia de los materiales, los sistemas cibernéticos de control metabólico por retroalimentación, el desarrollo de sensores que exploran el entorno y muchos otros aspectos que nosotros reconocemos como campos afines a las ciencias básicas y a la ingeniería.

Los procesos de la naturaleza también involucran el escalamiento desde un nivel nano y micro hasta lo macro. Los sistemas vivientes archivan los registros de toda esta información mediante un código genético que se transmite de una generación a otra.

Desde los primeros tiempos de la humanidad la emulación de la naturaleza nos ha servido como una estrategia de supervivencia. Es extensa la lista de casos en la que ingenieros, arquitectos,

científicos y artistas han basado su inspiración en la naturaleza, no solo por la búsqueda de la belleza sino también explorando las diversas cualidades que muestran sus estructuras y materiales, la eficiencia de sus procesos y la posibilidad de aprovechar los recursos que se encuentran a su disposición en el entorno, logrando optimizar sus funciones y orientando su búsqueda hacia nuevas fuentes de energía y el desarrollo de productos innovadores.

La naturaleza en el transcurso de más de 3.8 eones (3.800 millones de años) ha sido capaz de evolucionar logrando resolver de forma exitosa un proceso gradual que involucra el eliminar ciertas especies y dar paso a otras lo que ha generado la inmensa diversidad de organismos que habitan en nuestro planeta en el presente y la cuantiosa variedad de los que han desaparecido según nos indican los registros fósiles.

A diferencia de los diseños que realiza el ser humano que requieren de una copia lo más exacta que sea posible, los organismos realizan sus funciones manteniendo su identidad. Sin embargo, pueden ocurrir pequeños cambios que distinguen a un individuo de otro dentro de la misma especie, en otras palabras lo que se producen son copias pero no réplicas.

Otro aspecto de interés es que en la naturaleza se encuentran individuos que son muy parecidos pero que dependiendo de los requisitos de su entorno utilizan diferentes estrategias para realizar una misma función. También existen especies que presentando diferencias morfológicas evidentes logran adaptarse a su ambiente aplicando el mismo tipo de estrategias.

Se considera que un producto que sea innovador debería aportar tanto un valor agregado en su uso así como un mínimo de elementos que lo diferencien de otros productos similares, además por supuesto de cumplir con el fin último para el que fue concebido.

No obstante, se observa con frecuencia que las necesidades que plantea el mercado actual se expresan muchas veces por un incremento innecesario de la complejidad de los productos, en ciertos casos debido a la incorporación de

tecnologías que son demasiado sofisticadas para el uso que se persigue y en otros por la adición de una serie de funciones que en determinadas circunstancias no se justifican.

La aplicación de una metodología de diseño conceptual basada en la biomimética ofrece ciertas ventajas, una por reconocer que el proceso de diseño no tiene por qué plantear un solo tipo de solución ya que pueden existir otras opciones que permiten explorar nuevos caminos.

Otra de las ventajas que ofrecen los organismos vivos como modelos de diseño es que su estructura se basa en sistemas de células (con excepción de los organismos procariotas). Esta característica les permite crecer dentro de un margen amplio de tolerancia ante los posibles fallos en el sistema. Esta propiedad se expresa mediante funciones como las de auto - ensamblaje y la auto - reparación de sus estructuras.

Las entidades vivientes al mismo tiempo que mantienen su integridad estructural deben realizar una serie de funciones diferentes y de forma simultánea adaptándose a su vez a un entorno cambiante, es por eso que el diseño biológico debe ser plástico pero sin que se llegue a generar un cambio en la forma que sea de tal magnitud que comprometa su comportamiento como especie.

En los organismos vivos estas habilidades se consiguen mediante un sistema modular y al mismo tiempo jerárquico en el que los complejos moleculares, células y órganos actúan en cierta medida de forma autónoma pero al mismo tiempo no pierden su integración y cada parte contribuye a la supervivencia de la totalidad.

Es fascinante la forma en que los sistemas biológicos logran realizar todas sus funciones mediante los fenómenos de auto - organización y de emergencia operando bajo condiciones de temperatura y presión con muy baja tolerancia a los cambios que les permiten mantener la homeostasis y con un consumo de energía envidiable cuando se le compara con nuestras máquinas y a su vez perturbando lo menos posible al medio ambiente.

Los organismos logran sobrevivir sin llegar a alcanzar el estado ideal de perfección en sus funciones, una condición que podría comprometer su grado de plasticidad y con ella su capacidad de poder adaptarse a nuevos entornos.

En resumen, todo lo que necesitan hacer es vivir el tiempo suficiente para que puedan llegar a reproducirse y evolucionar de forma de garantizar que en un futuro dispondrán de suficientes recursos para poder cumplir con las funciones básicas de cada especie.

Estas características del mundo natural ofrecen una amplia gama de posibilidades que no solo involucran al diseñador industrial, al ingeniero o al arquitecto y que incluyen también el campo de otras profesiones, por ejemplo, el caso de aquellos que estudian el comportamiento animal como un modelo para extrapolarlo al del ser humano.

A continuación se plantearán algunas definiciones que consideramos necesarias para acotar el área de acción de la biomimética. Este es un aspecto que no es evidente dado la amplitud de su campo de acción como lo veremos reflejado en los párrafos siguientes mediante una serie de ejemplos de aplicaciones de esta disciplina en casos concretos. La siguiente sección del trabajo prosigue con la descripción y comparación de una serie de enfoques metodológicos que se han desarrollado a partir de la década de los años 60 con la intención de sistematizar los procedimientos de diseño.

El presente trabajo tiene como propósito dar a conocer esta nueva disciplina. No pretende profundizar en los mecanismos ni en los principios científicos que sustentan las distintas aplicaciones, ni tampoco presentar una revisión bibliográfica actualizada sobre el estado del arte en esta ciencia de encrucijada. Si con estas páginas logramos transmitir al lector la fascinación que nos produjo el contacto con esta tecnología capaz de copiar la vida, el esfuerzo realizado sin duda ha valido la pena.

II. DESARROLLO Y APLICACIONES DE LA BIOMIMÉTICA

Desde los primeros tiempos el hombre siempre ha observado la naturaleza como un ejemplo y fuente de inspiración. La idea del primer diseñador biónico se remonta a nuestra prehistoria cuando todavía éramos básicamente cazadores- recolectores.

La necesidad de tener que encontrar nuevos recursos nos llevó a iniciar un proceso de asimilación de conceptos que ya existían en la naturaleza, las garras y los colmillos de las fieras nos sirvieron de modelos para el diseño de armas para la caza, la anatomía comparada de los armadillos, de las tortugas y de otras especies que poseen corazas protectoras nos inspiraron para el diseño de escudos y artefactos de defensa y la copia del mimetismo de otras especies son estrategias que nos sirvieron para desarrollar sistemas de camuflaje y pasar desapercibidos en el entorno de caza.

En los textos de historia de ciencia y tecnología frecuentemente se considera a Leonardo Da Vinci, como un precursor de la metodología basada en la imitación de la naturaleza. Muchos de sus diseños estaban basados, en el estudio y el conocimiento de la naturaleza partiendo de los cuales se diseñó una serie de dispositivos que mostraban una relación muy estrecha en su estructura función con los sistemas naturales.

Un ejemplo de estos primeros desarrollos fue el alambre de espino, mejor conocido hoy en día como alambre de púas. Michael Kelly patentó su diseño en 1868 con el propósito de sustituir al arbusto llamado naranjo de Osage, utilizado en ese entonces para cercar al ganado en zonas en la que escaseaba la piedra y la madera [1].

Georges de Mestral en 1951 patentó el velcro un dispositivo basado en su observación de la naturaleza. Este ingeniero suizo acostumbraba pasear por las montañas de su localidad y un día afortunado percibió que las semillas de *arctium* se enganchaban a su ropa y al pelo de su perro [2]

Mestral examinó el material con un microscopio y pudo comprobar la presencia de filamentos que terminaban en ganchos que permitían su adherencia a los tejidos. La denominación de este material es un acrónimo que proviene de la conjunción de las palabras francesas *velours* y *crochet*, (terciopelo-tejido).

La biomimética debe gran parte de su enfoque y su desarrollo actual a su homóloga la biónica que en la práctica es considerada como su precursora.

Etimológicamente, la palabra biónica viene del griego "bios"; que significa vida y el sufijo "-ico" que significa "relativo a" lo que le confiere un carácter muy genérico a su definición.

El término biónica que está asociado a copiar, imitar y aprender de la biología fue acuñado por Jack E. Steele, de la Fuerza Aérea de los EE.UU. La definición de Steele señala que es "la ciencia de los sistemas que tienen alguna función copiada de la naturaleza, o aquellos que representan las características de los sistemas naturales o sus analogías" según él establece en su Tesis "Bionic Designs of Intelligent Systems" que presentó en un simposio en Dayton, Ohio, en el año 1963 [3].

El Diccionario Webster por vez primera en 1974, define biónica como: "el estudio de la formación, la estructura y función de las sustancias y materiales de origen biológico y los mecanismos y procesos biológicos, con el fin de sintetizar productos similares por mecanismos artificiales que imitan a los naturales". En esta definición se establece de forma implícita el binomio del proceso de análisis síntesis que supera otras definiciones anteriores [4].

Al igual que la biomimética la biónica no es una ciencia especializada, se le considera una disciplina entre ciencias, como sucede con la cibernética. Ambas disciplinas involucran el estudio de los sistemas vivos, la biónica, con el fin de encontrar nuevas ideas útiles para las máquinas y ciertos dispositivos electrónicos y la cibernética para buscar modelos de control por

retroalimentación. En los inicios de su desarrollo los investigadores de la biónica dedicaron considerables esfuerzos al diseño de prótesis y de otros instrumentos electro-mecánicos y también a las aplicaciones militares [5].

Jeanine Benyus en su libro “Biomimicry, innovation inspired by nature” hace referencia por vez primera a un nuevo término que ella define como “echo-inventions” basado en el símil del eco sonoro usado como réplica de las invenciones de la naturaleza [6].

Según Litinetski, “La Biomimética es una ciencia interdisciplinaria, o, como se acostumbra decir ahora, una ciencia encrucijada. Está formada sobre la base de las ciencias naturales y de infinidad de ciencias ingeniero técnicas. En esencia, sintetiza los conocimientos acumulados en biología, cibernética, física, psicología, biofísica” [7]

Vincent conjuga varias definiciones en una sola que resume de la forma siguiente: “Biomimética es conocida por varios términos pero todos ellos, aunque con diferentes palabras y frases, coinciden en que es una copia, adaptación o derivación de la biología, que siendo una ciencia relativamente joven aplica el uso práctico de los mecanismos y funciones de la biología en la ingeniería, el diseño, la química, la electrónica y otros campos de la ciencia” [8]

Como hemos podido notar en los párrafos anteriores no es fácil definir, clasificar y acotar el campo de la biomimética, en parte por su naturaleza inter e intradisciplinaria y por otra por la herencia evolutiva que le confiere la biónica y su confluencia de intereses.

Los temas que tratan ambas disciplinas son diversos y contemplan campos tales como: neurobiología, sistemas analizadores e inteligencia artificial, orientación y defensa, biomecánica y bioenergía, arquitectura y diseño.

En los términos de este trabajo consideramos la biomimética como una rama de la bioingeniería que como ya vimos tiene mucha afinidad con la

biónica pero que se diferencia de otras disciplinas como la biotecnología, bioinformática y la ingeniería genética.

Existen múltiples aplicaciones de la biomimética que parten desde el campo del diseño de productos industriales, pasando por la arquitectura hasta el desarrollo de tecnologías amigables con el ambiente.

La investigación en biomimética contempla el estudio de diversas características según el tipo de aplicación y las especificaciones que requiere el encargo de diseño que incluyen: estructuras, materiales, funciones y formas y con frecuencia la combinación de dos o más de estos atributos.

A continuación, describiremos algunas aplicaciones de la biomimética para el diseño de nuevos productos. Tratamos de colocar al menos un ejemplo de cada uno de los cuatro tipos de atributos que mencionamos antes.

En 1982 el botánico Wilhelm Barthlott, de la Universidad de Bonn (Alemania), descubrió que la hoja de loto (*Nelumbo nucifera*) presentaba una superficie muy hidrófoba que le confería una propiedad autolimpiable. Este desarrollo condujo a la comercialización del Lotusan, nombre comercial de una pintura para superficies autolimpiables.[9]

Barthlott y su equipo pudieron comprobar mediante la microscopía electrónica de barrido la presencia de una estructura rugosa en la epidermis de la hoja que afecta la tensión superficial haciendo que el ángulo de adhesión se incremente de forma que las gotas de agua de la lluvia arrastren las partículas depositadas sobre la superficie. Estos científicos alemanes comprobaron que la micro estructura topográfica de su epidermis, conjuntamente con las propiedades hidrofóbicas de la cera epicuticular eran los responsables de dicha propiedad [10].

Estudiando la estructura de los ojos de ciertas especies de polillas se han podido desarrollar superficies con propiedades de antirreflejo. Este

tipo de material se aplica en el recubrimiento de láminas de paneles solares y en las pantallas de los equipos electrónicos.

Aparte de su valor estético ciertas especies de mariposas han inspirando el desarrollo de nuevas tecnologías. Los colores que percibimos en las alas de algunos de estos lepidópteros no se deben a la presencia de pigmentos sino al modo en que se produce el proceso de reflexión y descomposición espectral de la luz solar que se produce en la superficie del ala.[11]

La investigación biomimética actual en este campo busca reproducir esas estructuras a escala nanométrica con el propósito de aplicarlas entre otros usos como “pigmentos” para la cosmetología exentos de componentes tóxicos. Además, se podrán fabricar estructuras ópticamente activas como recubrimientos para celdas solares y difusores ópticos

Científicos de la compañía General Electric se encuentran trabajando en una nueva tecnología basada en otra propiedad de las alas de las mariposas. Se trata de desarrollar una nueva generación de sensores para detectar explosivos y armas químicas, así como de aportar modelos de biomarcadores capaces de detectar en humanos ciertas enfermedades mediante el análisis de su aliento.

Las alas de color azul iridiscente de las mariposas del género *Morpho* presentan un tipo de escamas que tienen la capacidad de detectar moléculas en la atmósfera a pesar de encontrarse en muy baja concentración. Las nanoestructuras que se hallan debajo de las escamas reaccionan ante diferentes vapores, cambiando la reflectividad espectral del material que constituye las alas del insecto en función de los agentes a los que están expuestas

Un caso ya clásico de la biomimética y tal vez uno de los ejemplos que más se han difundido en el conocimiento popular es el llamado Efecto Gecko que se refiere a la propiedad de adherencia en seco que se produce sobre superficies muy lisas y que fue descubierta por el zoólogo

estadounidense Kellar Autumn, un descubrimiento que ha revolucionado al mundo científico en el campo de los adhesivos.

El Gecko, es un pequeño reptil que logra adherirse a superficies tan lisas como el vidrio y trepar por paredes verticales y techos sin caerse a una considerable velocidad.

La fuerza de adhesión en las patas del reptil es causada por las uniones de Van der Waals que se generan entre la superficie de contacto y unas estructuras altamente especializadas localizadas en los “dedos” del Gecko y se debe a la presencia de unos filamentos llamados setas que ramifican y terminan en unas estructuras distales que se denominan espátulas [12].

Tanto las setas como las espátulas están constituidas por la proteína queratina. El mecanismo de propulsión es muy interesante y explica la forma como logra el Gecko despegar la pata para poder desplazarse con una considerable velocidad a pesar de que el poder de adhesión es significativo (puede soportar un peso de hasta 7 kilos por cada cm² de superficie de contacto). La explicación se debe a que la adhesión es direccional, se pega cuando se mueve en un sentido y se libera cuando se desplaza en el sentido contrario, el efecto recuerda en cierta forma los pasos de baile de Tap.

Los investigadores en el área de la nanotecnología contemplan la posibilidad de poder producir en un futuro cercano espátulas sintéticas para su uso en la fabricación de “adhesivos inteligentes” que copien el efecto Gecko y aplicarlos para unir materiales como láminas de poliéster y nanotubos de carbono.

Mattheck desarrolló un modelo llamado Soft Kill Optio que se utilizó para diseñar el chasis de un coche de la empresa DaimlerChrysler sobre la base de la forma del pez cofre, (*Ostracion Meleagris*). Este vehículo tiene la inusual combinación de un gran volumen con una distancia pequeña entre ejes que le confiere algunas ventajas aerodinámicas que se reflejan en

una menor relación entre el consumo de combustible y su capacidad de carga [13].

La ballena jorobada, *Megaptera novaeangliae*, utiliza un método que es muy eficiente para lograr la captura de cuantiosas cantidades de Krill, un crustáceo pequeño que forma parte del zooplacton y que es muy abundante en los mares de aguas frías donde se alimenta la ballena. Con sus aletas esta ballena genera una serie de vórtices turbulentos en el agua que atrae el Krill. La estrategia del cetáceo se basa en crear cortinas de burbujas separadas por espacios de poco más de un metro.

Biólogos de la Universidad de New Chester en Pennsylvania, Estados Unidos, demostraron que las cortinas se producen por el diseño particular del borde de sus aletas donde se localizan una serie de nódulos con forma de estructuras tubulares dispuestas al azar.

El diseño de sus aletas le confiere ventajas considerables a este cetáceo porque mejora su nivel de sustentación, reduce la fricción y le permite alcanzar un ángulo de giro para poder atrapar el Krill y volver sin dificultad a alcanzar la posición de reposo. La función de los nódulos es compensar el giro del animal para que se pueda estabilizar y supere su considerable inercia pudiéndose desplazar en el agua con relativa facilidad. Se planea utilizar los resultados de estos estudios en el diseño de los generadores eólicos, entre otras aplicaciones, incorporando símiles de estas estructuras nodulares en los bordes de las aspas [14].

Otra aplicación de la hidrodinámica biológica al diseño biomimético viene del estudio de las propiedades de la piel del tiburón. Los vórtices inducidos por las crestas en la piel del escualo pueden reducir en forma significativa la fricción. Esta propiedad se ha aplicado al diseño de los cascos de los barcos y en el revestimiento interior de los conductos que transportan ciertos fluidos. Se ha hecho notoria su aplicación en los trajes de natación para competición de la marca Spido aunque todavía no está claro el valor de su

contribución para reducir los tiempos de los nadadores en las competencias.

El estudio de la piel del tiburón también dio origen a un material para el recubrimiento de paredes y techos de hospitales que evita la proliferación de bacterias y hongos. La empresa biotecnológica Sharklet Technologies Inc. se dedica a comercializar un tipo de láminas con superficie texturizada a micro escala que copian la piel del tiburón basada en las investigaciones realizadas por el Dr. Anthony Brennan en la Universidad de Florida [15].

Otro caso emblemático que demuestra la aplicación del diseño biomimético es el del tren bala construido en Japón en la década de los años 60, el denominado Shinkansen, de la West Japan Railway Company. Este era uno de los trenes regulares más rápidos del mundo en su tiempo, pero en su desempeño se presentaban un serio problema que era el ruido (trueno) causado por la presión del aire que generaba la onda de choque cuando el tren salía de los túneles en su recorrido.

Eiji Nakatsu, un ingeniero aficionado a la observación de aves, resolvió el problema utilizando como modelo la estructura del martin pescador. Como su nombre lo indica esta ave se alimenta de los peces que logra capturar pero lo singular en su caso es que su zambullida prácticamente no produce ondas en la superficie del agua [16].

El martin pescador adopta una hidrodinámica que reduce al máximo la fricción con el agua lo que le confiere una ventaja evolutiva permitiéndole que se pueda sumergir con rapidez y precisión, dos elementos que le son muy ventajosos en sus labores de pesca.

Nakatsu diseñó la cabina del tren bala copiando la estructura del pico y el ángulo de inserción en el cuello del ave en el momento en que se dispone a ingresar en el agua. El diseño logró una disminución considerable de la contaminación acústica que generaba el Shinkansen y ese estudio pasó a ser uno de los primeros triunfos

del enfoque biomimético en el campo del transporte.

Otro desarrollo ligado a los atributos de la forma de un ser vivo viene del estudio de la probóscide del mosquito que sirvió de base para el rediseño de las agujas hipodérmicas. Un equipo de científicos de la Universidad de Kansai en Osaka, Japón, patentaron una aguja hipodérmica casi indolora cuya superficie exterior es dentada en lugar de la aguja clásica que es de superficie lisa.

En realidad la estructura que produce la picada del mosquito son dos maxilares aserrados que forman parte de la probóscide del insecto. Estos maxilares tienen una superficie exterior aserrada por lo que presentan una menor área de contacto con los nervios de la piel disminuyendo la sensación dolorosa [17]

Existen organismos en la naturaleza que son campeones de la forma, otros muestran propiedades notables por su estructura interna o por los materiales que constituyen sus órganos y hay otros que parecen ser diseños cuasi perfectos en el sentido de poder enfrentar las condiciones extremas del medio donde habitan.

Este es el caso de un coleóptero del género *Stenocarasp*, un escarabajo que vive en el desierto (también conocido como escarabajo de Namibia) que investigó Andrew Parker en la Universidad de Oxford en el Reino Unido.

Este insecto obtiene su suministro de agua a partir de la humedad que contiene el aire del rocío que circula a través de los poros de su caparazón. La coraza del animal cuenta con unas estructuras microscópicas en forma de conos huecos que condensan el agua del aire y la conducen mediante canales especiales hacia su boca [18].

La empresa QinetiQ (especializada en tecnología militar) con sede en el Reino Unido, ha desarrollado un material que imita la estructura que recubre el dorso del escarabajo para captar el agua en las torres de refrigeración y en los condensadores industriales y aplicarlo también en zonas áridas con el propósito de condensar

durante la noche el agua de la niebla y paliar la sequía de muchas poblaciones humanas que habitan estas zonas y donde las fallas en el suministro de agua potable puede conducir a la muerte.

Los insectos en general aportan una fuente muy valiosa de información al diseño biomimético. En la Universidad de Newcastle en Gran Bretaña, Claire Rind una doctora en neurobiología estudia el mecanismo que emplean las langostas para evitar chocar entre ellas cuando vuelan en enjambres.

Las langostas y otros insectos sociales que vuelan en grandes colectivos de individuos poseen una neurona especial denominada LGMD (por sus siglas en inglés: Locust Giant Movement Detector) que se ubica en medio de los ojos del insecto. Esta neurona libera un potencial de acción en un lapso de milisegundos que se produce cuando la langosta se encuentra en la trayectoria de colisionar con otro de sus congéneres o con algún obstáculo presente en su entorno [19]

Existe un tipo muy particular de insectos llamados pirófilos que muestran un comportamiento bastante singular ya que se desplazan selectivamente a las áreas de los bosques que se han quemado recientemente debido a que en esas zonas obtienen alimento y logran reproducirse.

Una especie emblemática de ese tipo de insecto es el escarabajo *Melanophila acuminata* que cuenta con receptores de radiación infrarroja en sus patas anteriores lo que le permite detectar la zona donde se origina un incendio a distancias que superan los 100 km.

Los receptores son capaces de detectar fotones en el rango del IR, la radiación infra roja que alcanza la superficie interna del sensor ocasiona que el aire y los fluidos que se encuentran en ella se calienten expandiéndose transmitiendo señales de presión al sistema nervioso del animal. [20]

Entender el funcionamiento de este tipo de receptores biológicos nos ayudaría a desarrollar nuevos tipos de sensores anti-incendios. Como si fuera poco, este escarabajo cuenta también con un segundo mecanismo de refuerzo para detectar incendios debido a que posee antenas detectoras de humo. El escarabajo cuenta con un sistema tan sensible para la detección de partículas en el aire que puede discriminar entre señales distintas cual es la especie de árbol que ha sido la fuente del humo al quemarse

Existen mecanismos biológicos para la detección de incendios pero también hay otros que permiten “refrigerar” los ambientes. Este es el caso de los termiteros que actúan como climatizadores naturales cuyo diseño ha servido de inspiración a ingenieros y arquitectos en la búsqueda de nuevos sistemas de ventilación y control de temperatura que permitan el ahorro de energía en las edificaciones [21].

El punto es que para las colonias de termitas es esencial el poder mantener el sistema de regulación térmica en óptimo funcionamiento porque les permite cultivar un hongo del género *Termitomyces* que les sirve de alimento.

En Zimbabwe, se ha construido un centro comercial llamado Eastgate siguiendo un diseño basado en la estructura de los termiteros que ahorra hasta un 35% de la energía total que consumiría el edificio con refrigeración convencional.

Las termitas construyen sus moradas siguiendo una serie de principios básicos de termorregulación. La estructura interna del termitero cuenta con una chimenea para disipar el aire caliente que por ser más liviano sube por el conducto central. A su vez el aire más frío que proviene de los sectores subterráneos ubicados en la base del termitero intercambia calor por conductos laterales con el aire que asciende.

Estas estructuras llegan a ser tan eficientes que logran controlar la temperatura interna del termitero en un valor que fluctúa en solo un

grado centígrado entre el día y la noche. Se debe recordar que en las regiones desérticas donde habitan las termitas la variación de temperatura que ocurre entre el día y la noche puede llegar a superar una diferencia de 40 grados.

La reciente difusión del conocimiento en el campo de la biomimética, la novedad de sus enfoques y la atractiva visión que conllevan sus aplicaciones se traduce en el interés que muestran las escuelas de diseño y las facultades de ingeniería para incorporar cursos de formación en esta disciplina y ofrecer programas de estudio a nivel de pregrado y postgrado.

Un ejemplo es el del Biomimicry Center de la ASU- Arizona State University (USA) que ofrece anualmente cursos para estudiantes graduados con enseñanza online y actividades de laboratorio de corte presencial.

Uno de estos programas es el Master of Science in Biomimicry que está diseñado para los profesionales que trabajan principalmente en los campos de la biología, diseño, negocios e ingeniería, y que quieren hacer de la práctica de biomimética un aspecto central en sus carreras. El mismo centro cuenta con un segundo programa el Graduate Certificate in Biomimicry diseñado para profesionales que quieren añadir la práctica de la biomimética a una carrera ya existente.

III. METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PRODUCTOS CON ENFOQUE BIOMIMÉTICO

El diseño es una actividad multidisciplinar de investigación, análisis y desarrollo, estructurada y planificada con el fin de concretar y alcanzar unos objetivos previamente establecidos con el propósito de satisfacer una necesidad.

La actividad de diseño busca la mejora de los productos en aspectos tales como su: funcionalidad, estética, ergonomía, aplicación adecuada de los materiales y que además pueda ofrecer procesos de fabricación alternativos y

eficientes, logrando la reducción de costes a lo largo de la cadena de valor del producto.

Hoy en día, contamos con una serie de tablas, base de datos y listas de principios donde se pueden establecer analogías y otras relaciones entre las características de la naturaleza y aquellos de sus atributos que el hombre puede aplicar a los artefactos.

La integración de la biomimética en el proceso de diseño potencia la innovación en los productos y se realiza aplicando una serie metodologías que contemplan todos los niveles desde los más básicos, por asimilación de una forma o una determinada geometría, hasta los más complejos que se aplican a los sistemas de control y detección.

La metodología según Martí es “la descripción, validación, estudio, análisis y utilización de diversos métodos, es decir que realiza un estudio de los métodos más adecuados para su utilización en cada caso en particular”. Según este autor la metodología se puede entender como un metalenguaje de los métodos, la descripción general o específica de estos, su validación, el análisis de sus usos y el estudio y desarrollo de otros nuevos [22].

Existen numerosos modelos metodológicos para el diseño industrial pero en general lo que se busca en todos ellos es que por lo menos cumplan con tres requisitos: a) La flexibilidad, de modo que sea posible aplicar el modelo a distintos tipos de diseños de producto. b) Que se establezca una continua retroalimentación de forma que le permita a los diseñadores mantener un control sobre el desarrollo de cada fase. c) Que cuente entre sus fortalezas con una fase de diseño conceptual que sea sólida para que se facilite la posibilidad de desarrollar otras nuevas soluciones, en lugar de simples copias mejoradas de los sistemas que ya existen.

Describiremos a continuación algunos aspectos en los que se ha basado el desarrollo de una serie de metodologías que se han aplicado (algunas todavía están vigentes) en el campo del diseño

biomimético de productos para el sector industrial.

3.1 La evolución de una metodología basada en la simple observación e imitación de la naturaleza al diseño por etapas.

Las primeras aproximaciones al tema del diseño biomimético se basaban en el simple principio de que la observación per se inspira a la aplicación. Esta metodología planteaba el postulado de que las ideas se pueden copiar directamente del mundo natural sin profundizar en el propio objetivo de diseño. Las ideas luego se deben transformar en soluciones a problemas de diseño o de ingeniería en una fase posterior partiendo de principios y modelos que aportan otras disciplinas. [23].

Lodato, un diseñador biónico reconocido en el campo aunque no descarta el valor de la observación directa propone un esquema por fases más elaborado para el estudio de la naturaleza aplicando un proceso de imitación que diferencia en cinco tipos: imitación completa, parcial, funcional, mediante un proceso de abstracción y por inspiración. Lodato también propone una metodología donde se establecen cuatro fases para el proceso de diseño: a) seleccionar las características de un organismo que sea de interés como un modelo biomimético, b) detectar y obtener los principios y los procesos que otorgan esa superioridad al organismo, c) elaborar métodos y modelos para describir los sistemas biológicos en términos útiles para los diseñadores y d) demostrar la viabilidad del diseño al traducir este conocimiento en un producto eficaz [24]

3.2 Enfoque metodológico del Instituto Europeo de Diseño de Milán [IEDM]

Lozano y Songel, son dos de los exponentes más representativos de esta escuela de diseño que forma parte del departamento de Biónica del IEDM. Estos investigadores proponen el uso de cinco tipos de metodologías de diseño biomimético que como veremos no son excluyentes y pareciera más que asemejan

actividades complementarias a todo el proceso o etapas en la evolución del proceso de diseño [25], [26]

Tipo 1: El propósito es el de construir un banco de datos sobre las propiedades y características del comportamiento de un determinado organismo que sirva como instrumento para la gestión de la biónica aplicada al diseño. En primera instancia con este tipo de metodología no existe ninguna garantía de que toda esta información llegue a ser útil para un encargo de diseño.

Tipo 2: Analiza los elementos de ciertos organismos que resuelven problemas similares al que determina el encargo de diseño. Este tipo de método se vuelve con frecuencia muy selectivo y deja por fuera a otros organismos que pueden aportar una información valiosa y servir también como modelos biomiméticos.

Tipo 3: Involucra una mezcla de los tipos 1 y 2 y se traduce en definir previamente cuales son los principios y fundamentos del problema proyectual de diseño para luego hacer uso de la información recopilada en el banco de datos (T1) acotando el estudio a los organismos cuyas propiedades son las más pertinentes (T2).

Tipo 4: La principal característica de este tipo de metodología es el establecimiento de una analogía desde un principio basado en el planteamiento de la necesidad de diseño. Este tipo de enfoque plantea una visión que es frecuente en este campo que va de arriba hacia abajo que como veremos se repite en otras metodologías que se discutirán más adelante.

Tipo 5: Este tipo de metodología es un poco más elaborado y requiere en un rango mayor de la participación de especialistas en las distintas ramas del conocimiento. El método plantea un proceso de diseño en el que se van integrando los resultados de la investigación biónica en las distintas fases de su desarrollo. Este tipo de metodología conjuga la participación de investigadores del área analítica que se enfocan sobre temas naturales (biólogos) que luego

comunican en forma sistemática sus hallazgos a los investigadores proyectistas (ingenieros).

3.3 Enfoque bidireccional de la Universidad de Friburgo

Este tipo de metodología fue desarrollada por Milwich y su grupo de colaboradores en la Universidad de Friburgo. El enfoque adoptado en Friburgo para hacer diseño biomimético es comenzar con una investigación de corte biológico básico atendiendo a los elementos como la biomecánica y la morfología funcional de los organismos, para después transmitir estos nuevos conocimientos a otros integrantes del equipo de investigación para su procesamiento siguiendo una ruta de abajo hacia arriba [27].

Además, complementan esta primera estrategia con otra ruta alternativa que es un tipo de metodología de arriba hacia abajo buscando posibles soluciones para problemas específicos partiendo de las necesidades que determina el encargo de diseño.

Usualmente se plantea un compromiso entre los dos tipos de estrategias (top-down y bottom-top), la segunda estrategia permite el desarrollo de productos biológicamente inspirados en un tiempo menor, mientras que la primera tiene el potencial de producir mayor diversidad de logros en innovación en el mediano y largo plazo.

Ambos procesos son válidos y tienen en común el hecho de que para ser desarrollados es necesaria la colaboración interdisciplinar entre tecnología y biología, y esto es algo difícil de conseguir tanto para el experto biólogo como para el ingeniero experimentado. Se hace evidente el hecho de que no es sencillo encontrar un especialista capaz de aplicar los resultados de ambos procesos y por eso se hace difícil encontrar la información adecuada en el formato adecuado. Esta limitación está presente en todos los métodos que se han presentado hasta ahora y en los otros que veremos a continuación.

3.4 Enfoque de diseño del Centre for Biologically Inspired Design [CBID]

Un estudio llevado a cabo en el Instituto Tecnológico de Georgia, en Atlanta EE.UU, entre el Design Intelligence Lab, School of Interactive Computing y el Center for Biologically Inspired Design ha establecido una metodología alternativa para el desarrollo de proyectos de diseño biológicamente inspirados [28].

En este estudio se establece un marco en el que se han determinado unas características que hacen del diseño inspirado biológicamente algo más coherente porque plantea algunos de los requisitos y las restricciones para conseguir éxito al definir una metodología que sea aplicable. Estas características se traducen en una metodología descriptiva orientada más a lo que hay que hacer en vez de cómo hay que hacerlo, más típico de los modelos normativos expuestos en las metodologías anteriores.

Estos procesos creativos se inician con el reconocimiento de un problema y su replanteamiento. En una primera aproximación se define cual es el problema por medio de dos técnicas, la descomposición funcional y la optimización funcional.

La descomposición funcional como la misma palabra lo indica permite separar una función compleja en sus subcomponentes funcionales que en diseño se denominan las funciones secundarias o auxiliares. Los sistemas biológicos son complejos, multifuncionales e interconectados por lo que es difícil obtener una función sencilla a partir del todo.

La segunda técnica que es la optimización funcional donde se define una función o grupo de ellas como una ecuación que permita optimizar la solución del problema.

3.5 La Espiral de Diseño del Biomimicry Institute

El Biomimicry Institute fue fundado por Janine Benyus quien promueve el aprendizaje de

biomimetismo emulando las formas naturales, los procesos y los ecosistemas para crear nuevos diseños y tecnologías más sanas y sostenibles [29]

En las secciones anteriores del trabajo ya habíamos mencionado a la Dra. Benyus como la primera en haber acuñado el término biomimética.

Utilizando su lema, “la biomimética una herramienta para la innovación “, Benyus apoya a los innovadores de diversas áreas del conocimiento a utilizar esta disciplina como una herramienta para crear diseños más sostenibles.

El proceso de la biomimética que plantea Benyus y el Biomimicry Institute , se describe por medio de la espiral de diseño que se muestra en la **figura 1**. Una de las ventajas de esta metodología es que puede servir como una guía para ayudar a los innovadores en superar el reto de imitar a la naturaleza en todos los niveles de la organización de los ecosistemas.

La metodología que describe la espiral no extrae información de la naturaleza exclusivamente para el diseño final del producto, sino también se aplica al proceso de fabricación, envasado, y toda la ruta de un producto hasta las etapas del envío, distribución, y de darse el caso de su recuperación. El método sigue en secuencia los seis pasos de la espiral: identificar, interpretar, descubrir, abstraer, emular y evaluar que se definen a continuación.



Figura 1. Espiral de Diseño Biomimético (Fuente: Biomimicry Institute)

Identificar: Desarrollar y perfeccionar diseños basados en las lecciones aprendidas de la evaluación de los principios de la vida.

Interpretar: Trasladar las funciones de diseño en funciones que desarrolla la naturaleza. Preguntar, ¿cómo la naturaleza hace esta función?

Descubrir: Encontrar los mejores modelos naturales para responder a nuestras preguntas.

Resumir: Encontrar los procesos y patrones repetitivos con los que la naturaleza logra el éxito. Crear taxonomías de estrategias de la vida. Seleccionar las estrategias más relevantes que cumplan con su diseño particular.

Emular: Desarrollar nuevas ideas y soluciones basadas en modelos naturales.

Evaluar: Comparar las ideas de diseño con los principios naturales exitosos de la vida e identificar otras formas de mejorar el diseño

En esta metodología se requiere disponer de una base de conocimiento importante sobre los aspectos biológicos del problema. En la Web se cuenta con bases de datos de libre consulta como la ASK Nature 2012 donde se presenta una taxonomía con los resultados biológicos obtenidos de múltiples estudios y donde se organizan y clasifican una serie de estrategias por grupos, subgrupos y funciones obtenidas a partir del ámbito natural.[30]

3.6 BioTriz

BioTriz es una metodología desarrollada por Vincent en la Universidad de Bath, en el Reino Unido, en la que se conjuga el conocimiento de la biología con la técnica Triz que es el acrónimo ruso de la Teoría de la Inventiva de Resolución de Problemas, una colección de herramientas y técnicas, desarrolladas por Genrich Altshuller y Rafik Shapiro [31],

BioTriz se plantea como una herramienta de uso sistemático para la resolución de problemas técnicos basándose en soluciones análogas encontradas en la naturaleza.

El desarrollo de Triz estuvo basado en la observación de la evolución de los objetos técnicos mediante el análisis de miles de patentes de innovación, cuyas soluciones inventivas aplicadas conforman un número de principios inventivos de aplicación general a través del razonamiento inductivo. La presencia de ciertas pautas inventivas que se repetían en distintos sectores industriales, el acceso al conocimiento externo al problema y la evolución de las tecnologías, sentaron las bases para el desarrollo de esta metodología [32].

Triz ha sido muy exitoso en la transferencia de invenciones y soluciones de un campo de la ingeniería a otro. Debido a que el objetivo fundamental de la biomimética coincide también con la transferencia de funciones, mecanismos y principios de la biología a la ingeniería, Triz aparece como un punto de partida ideal como herramienta de aplicación al diseño biomimético.

Biotriz comienza con una etapa de definición donde se utilizan una serie de técnicas que aseguran que el problema se encuentre ubicado dentro de un contexto correcto. Finalizada esta primera etapa se enumeran los recursos disponibles.

El problema es caracterizado mediante la confrontación de características opuestas “que es lo que quiero” frente a “que me impide conseguirlo.

Triz se basa en una matriz de 40x40, a modo de tabla de doble entrada donde se consideran los principios inventivos que sirven como elementos para hacer analogías.

En el caso de BioTriz esta matriz se ha simplificado para poder aislar los campos que afectan a la biología, campos como la información, la energía, el tiempo, el espacio, la estructura y la sustancia.

Aunque conceptualmente Biotriz da una buena respuesta a la utilización de las soluciones naturales en el mundo de la tecnología no es una técnica fácil de implementar ya que requiere que

existan canales muy eficientes de comunicación entre el biólogo y el ingeniero.

Para tratar de solventar estas dificultades se han desarrollado tres tipos de herramientas. La primera herramienta parte de un enfoque que considera a la naturaleza como una gran base de datos de patentes naturales, afortunadamente ya existen bases de datos de principios de biología que permiten extraer funciones, materiales, estructuras o mecanismos que pueden ser útiles para solución a los problemas técnicos planteados en ingeniería [33].

La segunda herramienta ha sido desarrollada por el Centro de Tecnologías para Superficies Biológicas o Bio-inspiradas, en el Instituto Max-Planck y está basada en un sistema selector de materiales que cuenta con una base de datos de unos mil materiales biológicos con sus características y definiciones para su adecuada utilización en aplicaciones concretas [34].

La tercera herramienta, se basa en un sistema de léxico que busca palabras clave en textos y otras publicaciones en el campo de la biología que se corresponden con los términos en los que se puede definir un problema técnico en ingeniería [35].

IV. CONCLUSIONES

El hombre hace biomimética debido a su necesidad natural de descubrir, crear y perfeccionar aquello que le rodea. La naturaleza le sirve de modelo, medida y mentor, haciéndolo al igual que lo hace la naturaleza logra alcanzar el potencial para cambiar el modo de obtener recursos alimenticios, nuevos materiales, aprovechar nuevas fuentes de energía y dirigir negocios.

La idea fundamental no es la de copiarse de la naturaleza, aprendimos que es más provechoso entenderla y aplicar su saber-hacer para solucionar nuestras necesidades. Estudiar la estructura y la evolución de los objetos naturales

puede incluso ayudar a comprender el propio mundo.

Las herramientas de diseño son métodos para la búsqueda de ideas y de posibles soluciones y como hemos podido corroborar de una manera general tanto las herramientas de diseño como las propias metodologías están basadas en métodos creativos descritos como analogías.

En el transcurso hemos sido testigos de la evolución de un proceso que parte de unas primeras aproximaciones al problema de diseño biomimético mediante la observación directa de la naturaleza y que luego llega a diversificarse hacia una metodología por etapas donde se plantea la necesidad de reunir un banco de datos a partir de los cuales se facilite la búsqueda de posibles aplicaciones prácticas a los productos y procesos industriales.

Se promueven dos tipos de enfoques para el análisis del diseño biomimético, el top - down y el bottom - up con sus fortalezas y debilidades respectivas. El primero de arriba hacia abajo aporta como beneficio la direccionalidad del propósito desde el inicio lo que reduce la magnitud del esfuerzo pero limita en cuanto a la amplitud del campo de acción. El segundo de abajo hacia arriba gana por la riqueza de sus indagaciones pero peca por el factor de dilución que se produce debido a la amplia data acumulada.

El enfoque del CBID se centra en un aspecto diferente que otras metodologías en cierta medida habían descuidado que es la preocupación con la naturaleza del método per se y no solo en las etapas del proceso y los objetivos de diseño.

Hasta el presente se han desarrollado dos metodologías que han demostrado poseer una serie de fortalezas que las hacen sobresalir en este campo. La espiral de diseño del Biomimicry Institute es uno de los enfoques que se encuentra entre los de mayor difusión en el campo del diseño biomimético por su versatilidad y al mismo tiempo por su simplicidad. BioTriz también sobresale por su método estructurado que

hereda experiencia obtenida a través de los años de aplicación en la industria del método Triz.

Concluimos el trabajo volviendo al tema de la definición de términos. Biomimética es una disciplina de diseño, una rama de la ciencia, un método para resolver problemas, una ruta de sostenibilidad, un movimiento, una estrategia para crecer vigorosamente, una posición frente a la naturaleza, una nueva manera de ver y de valorar la biodiversidad y en la medida en que más se parezca nuestro mundo al mundo natural tendremos más posibilidades de ser aceptados en este hogar que es el planeta y que es nuestro pero que no es solo nuestro.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Dra. María Isabel López, Directora del CIDI, al Dr. Wilmer Pereira, Director de la revista Tekhne y a la Dra. Beatriz Soledad, Jefe de Redacción, por la confianza brindada al invitarme a participar en la edición especial 2017 de la revista Tekhne en ocasión de cumplirse este año el vigésimo aniversario del Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería (CIDI).

Igualmente extendiendo mi gratitud al Profesor Alejandro Ríos por su labor en el desarrollo del formato digital y a la Bachiller Vanessa Pérez estudiante asistente del CIDI por su labor de compilación de los artículos.

Y a mi esposa Yolanda como siempre por transmitirme su ánimo inquebrantable y por sus atinadas observaciones durante el desarrollo del artículo.

REFERENCIAS

- [1] Basalla, G., [1988] *The Evolution of Technology*. New York: Cambridge University Press, pp. 49-55.
- [2] Velcro. Disponible en: <<http://www.velcro.es/>>. Consultar: The Biography.com website <https://www.biography.com/people/george-de-mestral-9271201>. Consulta 14/09/2017
- [3] Gray C. [1995]. 'an Interview with Jack E. Steele'. The Cyborg Handbook, 1995. pp. 61-69.
- [4] Webster Dictionary on-line. Design definition. Disponible

- en: <<http://www.websters-online-dictionary.org/definitions/bionics>>. Consulta 14/09/2017
- [5] Di Bartolo C, [2000]. Naturaleza como modelo, naturaleza como sistema. Experimenta: ediciones de diseño, n° 31. pp. 39-45.
- [6] Benyus, J. [2015]. Life principles. The Biomimicry Institute. Montana: Disponible en <https://biomimicry.org> Consulta 14/09/2017
- [7] Litinetski I. [2005], Iniciación a La Biónica. Barcelona: Barral, 2005.
- [8] Vincent J [2009]. Biomimetics — a review. Disponible en: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1243/09544119jnim561>. Consulta 14/09/2017
- [9] Brown R [1998] Laboratory vessel having hydrophobic coating and process for manufacturing same Patente USPTO n° 5853894, Issued December 29, 1998
- [10] Koch, K; Bhushan, B y Barthott, W. [2009] Multifunctional Surface Structures of Plants: An Inspiration for Biomimetics. Progress in Materials Science, 2, , vol. 54, n° 2. pp. 137-178.
- [11] Takemura, S., Stavenga, D. y Arikawa, K. [2007], Absence of eye shine and tapetum in the heterogeneous eye of Anthocharis butterflies [Pieridae], The Journal of Experimental Biolog, 210, pp.3075-3081.
- [12] Carlo M y Metin S [2006];. A biomimetic climbing robot based on the gecko. Journal of Bionic Engineering, 9, , vol. 3, n° 3. pp. 115-125.
- [13] Mattheck C y Bethge K [2001]. Encyclopedia of Materials: Science and Technology [Second Edition]. Oxford: Elsevier,. Mechanical Optimization in Nature, Principles of, pp. 5247-5250.
- [14] Miklosovic D ; Murray M ; Howle y Fish F. [2004] Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale “ Megaptera novaeangliae flippers Physics of Fluids Vol 16. N° 5
- [15] Sharklet Technologies, Inc.. Disponible en: <<http://www.sharklet.com/>>. Consulta 14/09/2017
- [16] Nakatsu E: [2012] Lecture on Biomimicry as applied to a Japanese Train Disponible en : http://labs.blogs.com/its_alive_in_the_lab/2012/04/biomimicry-japanese-train.html Consulta 14/09/2017
- [17] Ramasubramanian M, Barham O y Swaminathan V [2008] Mechanics of a mosquito bite with applications to microneedle design. Published 8 September 2008 • 2008 IOP Publishing Ltd Bioinspiration & Biomimetics, Volume 3, Number 4
- [18] Parker A, y Lawrence C [2001]. Water Capture by a Desert Beetle. Nature, 11/01, vol. 414, n° 6859. pp. 33-34.
- [19] Reid R. y Harrison. A [2003] Low-Power Analog VLSI Visual Collision Detector In Proceedings of the Neural Information Processing Systems 2003, December

- [20] Hammer I ; Seigert J ; Stone M ; RylanderIII M y Welch A [2001] Journal of Insect Physiology Infrared spectral sensitivity of *Melanophila acuminata* Volumen 47, Issue 12, December, Pages 1441-1450
- [21] Arquitectura Biomimética : La refrigeración de los Termiteros. Disponible en: <http://wp.cienciaycemento.com/arquitectura-biomimetica-y-la-refrigeracion-de-los-termiteros>. Consulta 14/09/2017
- [22] Marti Font, J [1999]. Introducció a la metodologia del disseny. 1a ed UAB ed.,
- [23] Roshko, T.,[2010] The pedagogy of bio-design: Methodology development. WIT Transactions on Ecology and the Environment.138, pp. 545-558,
- [24] Lodato F [2000]. Biónica: La naturaleza como herramienta de innovación. Experimenta: ediciones de diseño, nº 31. pp. 46-51.
- [25] Lozano Crespo, P [1994]. El diseño natural. Aproximación histórica, metodologías, aplicación y consecuencias. Tesis doctoral U. Complutense de Madrid.
- [26] Songel G [1991]. Estudio metodológico de la biónica aplicada al diseño industrial. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia,
- [27] Milwich M., [2006]. Biomimetics and technical textiles: solving engineering problems with the help of nature's wisdom. American Journal of Botany, vol. 93, nº 10. pp. 1455-1465.
- [28] Helms, M., Vattam, S. y Goel, A.[2009], Biologically inspired design: process and products. Design Studies. 30 [5]. pp. 606-622,
- [29] The Biomimicry Institute. Disponible en <https://biomimicry.org>
- [30] Ask Nature. Biomimicry Taxonomy. Disponible en: <https://asknature.org/resource/biomimicry-taxonomy/#.WbvreF7go3g>. Consulta 14/09/2017
- [31] Vincent, J., Bogatyreva, O , Bogatyrev, N., Bowyer, A. y Pahl, A.,[2006] Biomimetics: Its practice and theory. Journal of the Royal Society Interface,3[9],pp.471-482, Disponible en <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2006.0127>. Consulta 14/09/2017
- [32] Bogatyreva, O ., Pahl, A.. y Vincent, J. [2002] Enriching TRIZ with biology: The biological effects database and implications for teleology and epistemology. ETRIA World Conference-2002, Strasbourg, pp. 3-1-307.
- [33] Sánchez Merino, R. [2015]. Biomimética: una metodología de diseño sostenible. En Arquetipo volumen [11], Julio- Diciembre pp. 25 – 40
- [34] Mak, T.. and Shu, L. [2004] ., Abstraction of biological analogies for design. Cirp Annals-Manufacturing Technology, 53 [1], pp.117-120. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60658-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60658-1). Consulta 14/09/2017
- [35] López-Forniés, I. y Berges-Muro, L [2010]. Relation between biomimetic and functional analysis in product design methodology. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 138, pp 317-328, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2495/DN100271> . Consulta 14/09/2017



CAPITALISMO CLIMÁTICO

¿Una crisis productiva?

Rafael Muñiz¹

rmuniz53@gmail.com

¹ Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería (CIDI). Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, Venezuela.

Historia del Artículo

Recibido 22 de Febrero de 2018

Aceptado 12 de Abril de 2018

Disponible online: 29 de Mayo de 2018

Resumen: El mejor camino para reconstruir la economía de nuestras naciones, sus ciudades y los mercados de trabajo es abrazar la eficiencia, la innovación y la sustentabilidad en conjunción con el desarrollo y la implementación de las nuevas tecnologías con el fin de alcanzar una reducción mantenida de las emisiones de carbono en el planeta. Según la postura que se plantea en este artículo la decisión más inteligente que podemos tomar y a su vez la más lucrativa no solo es factible de aplicar sino que también ayudará a salvar el planeta de la catástrofe que se avecina, si no se hace nada o lo que hagamos es insuficiente. Los empresarios, los ambientalistas y los ciudadanos comunes deben interesarse en buscar ideas lucrativas y hoy existen múltiples ejemplos tangibles de empresas y personas en el mundo entero que se están adaptado al cambio climático y que creen que una economía de bajo carbono conduce a mayores ganancias económicas en el corto, mediano y largo plazo, propiciando un crecimiento económico que nos permita vivir en el planeta lo mas ameno y sustentable que sea posible.

Palabras Clave: Cambio climático, negocios verdes, crecimiento económico sustentable

CLIMATE CAPITALISM

A productive crisis?

Abstract: The best way to rebuild the economy of our nations, cities and labor markets is to embrace efficiency, innovation and sustainability in conjunction with the development and implementation of new technologies in order to achieve a sustained reduction in carbon emissions on the planet. According to the position set out in this article, the most intelligent decision we can make and, in turn, the most lucrative is not only feasible to apply, but will also help save the planet from the looming catastrophe, if nothing is done or what we do is insufficient. Entrepreneurs, environmentalists and ordinary citizens should be interested in looking for lucrative ideas and today there are many tangible examples of companies and people around the world that are adapted to climate change and believe that a low carbon economy leads to greater economic gains in the short, medium and long term, propitiating an economic growth so that we can live on the planet as enjoyable and sustainable as possible.

Keywords: Climate change, green business, sustainable economic growth.

I. Introducción

“El socialismo sucumbió porque no le permitió al mercado contar la verdad económica. El capitalismo se puede desmoronar si no le permite al mercado que cuente la verdad ecológica”.

Oystein Dahle [1]

Vicepresidente de Exxon-Noruega

El colapso financiero del 2008 que hizo perder activos a nivel mundial por un valor de trillones de dólares tomó a casi todo el mundo por sorpresa, no obstante eso no le sucedió a Nassim Taleb autor del best-seller: *El cisne negro: el impacto de algo altamente improbable* ; [2] en esta obra él

logró predecir con bastante exactitud el momento y las causas del desastre inmobiliario y financiero de esa fecha. Taleb lo hizo por prestar más atención a ciertos eventos que suceden algunas veces, aunque su probabilidad sea baja y que crean efectos con grandes consecuencias, efectos a los que llama el autor los cisnes negros y en su opinión dichos eventos son cada vez más frecuentes.

Los triunfadores del futuro serán aquellos que estén preparados para no solo aceptar esos eventos, que podrían en algún momento acontecer, sino que es muy probable que acontezcan. La sabiduría convencional dice que actuar para proteger el clima será muy caro y que las naciones probablemente no podrán costear eso, todavía más si tienen que enfrentar una economía que se encuentra en descenso en muchos países.

Siguiendo ese orden de ideas, en la Figura 1 se presentan tres opciones para enfrentar la crisis que plantea el cambio climático, dichas opciones no son excluyentes, es mas en muchos casos la respuesta de los países, de las instituciones y de la población en general involucra en cierta medida una combinación de esas tres opciones.

La primera opción, la adaptación, parece una postura muy cómoda y en gran medida irresponsable con nuestra situación actual y todavía en mayor grado con las que enfrentarán las generaciones que nos sucederán en este planeta. Parece claro que la segunda opción, la mitigación no es solo una opción sino una necesidad imperativa hoy en día pero esta opción no ha sido un camino fácil, ni por los costos económicos ni por los costos políticos que conlleva.

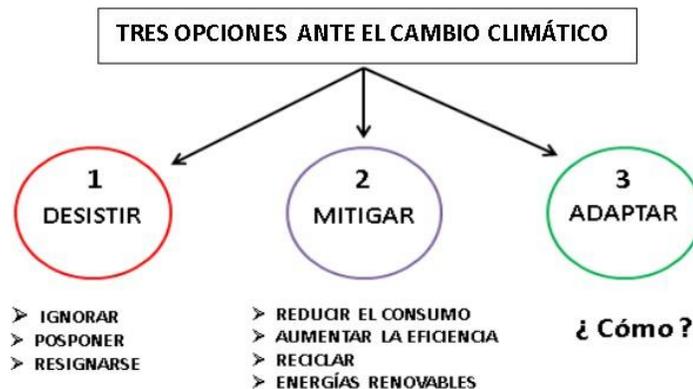


Figura 1: Opciones para afrontar el impacto que ocasiona el Cambio Climático.
(Fuente: el autor)

Bajo el paraguas de las dos primeras opciones, es decir desistir y mitigar, muchos de los negocios convencionales no podrán sobrevivir, en buena parte debido a que las mejores prácticas convencionales no serán suficientes para poder lidiar con los desafíos que enfrenta el mundo en el presente y que se proyectarán con mayor

impacto hacia un futuro no muy lejano. Se necesita la participación de la tercera opción la adaptación al cambio como un recurso y una estrategia que debemos aplicar, una tendencia que cada día se hace más evidente.

El hecho de que varios de los mayores ecosistemas del mundo se aproximan al colapso, el fin de la bonanza del petróleo, la inminente limitación en la cantidad disponible de alimentos, la crisis por el suministro del agua, entre otros efectos crean preocupación en los ciudadanos de todo el orbe.

Este artículo defiende el punto de vista de que la inminencia del colapso económico y ambiental no necesariamente es una consecuencia irrefutable de nuestras acciones y omisiones y que aquellos que adopten ciertas estrategias del Capitalismo Climático se encontrarán en una ruta al menos más confiable y promisorio hacia la prosperidad.

Para afrontar el problema ambiental según el enfoque adaptativo se visualizan tres aspectos básicos:

- a) Se debe incrementar la eficiencia en el uso de la energía además de invertir en el desarrollo de fuentes de energía alternativa
- b) Debemos mejorar substancialmente el rendimiento y la calidad del sector productor de alimentos
- c) Si no es posible librarnos del impacto de los cambios drásticos de las condiciones climáticas y los fenómenos atmosféricos debemos tratar de mitigar sus efectos [3].

A continuación plantearemos algunas ideas de cómo desarrollar estos tres aspectos del enfoque adaptativo incluyendo ejemplos de iniciativas que han sido exitosas para potenciar este tipo de estrategias.

II. Aumentar la eficiencia energética

En vista del impacto que está ocasionando el cambio climático y a pesar del esfuerzo que se les debe reconocer a un considerable número de industrias establecidas desde hace ya bastante tiempo

por mitigar sus efectos, la mayoría de los consorcios siguen siendo dependientes de tecnologías del siglo pasado. Nuestra mayor esperanza de que una mejora significativa se materialice es lograr que se produzca un cambio de actitud y de aptitud que se origine en la misma comunidad de los empresarios, sin embargo las experiencias que se han acumulado en las últimas décadas muestran resultados que no son muy promisorios y que se reflejan en los siguientes aspectos:

Un primer aspecto es que no se asigna ni se paga el valor real de lo que nos cuesta la energía. Por ejemplo, los subsidios para las industrias de energía solar, eólica y de biocombustibles corresponde solo a un 1% de los subsidios que se otorgan a la industria de los combustibles fósiles.

La Asociación Internacional de Energía (IEA) [4] estimó que solo con eliminar esos subsidios aberrantes entre los años 2011 y 2020 se puede reducir la demanda global de energía en un valor de hasta un 6% lo que representa un logro enorme que corresponde en suma de la energía que consumen al año: Japón, Corea del Sur, Australia y Nueva Zelandia.

Un segundo aspecto es que se debe contar la verdad, aunque a veces sea algo incómodo. Una información que sea veraz es necesaria y constituye un elemento importante en la resolución del problema ambiental. En 2010 la Coalición Climática Global, una asociación de empresas del área del petróleo que incluye a las empresas: Amoco, Chevron, Exxon, Shell y Texaco y a la que se suman otros gigantes de la industria automotriz tales como Ford, Chrysler y GM gastó solo en ese año más de 60 millones de US\$ en campañas publicitarias para intentar que la población acredite que cualquier reducción

en el consumo de combustibles fósiles causaría un colapso económico a nivel mundial, lo que arruinaría a muchos negocios dentro y fuera de ese sector

Hay también aspectos positivos como lo presenta el informe sobre riesgos empresariales de Ernst & Joung donde se concluye lo siguiente: a fin de mantener su imagen corporativa y al mismo tiempo reducir su impacto ambiental, las empresas precisan adoptar medidas proactivas que incluyan tomar decisiones a veces muy complejas respecto a los gastos de capital, los procesos de producción y las tecnologías instaladas, todo en función de la protección del clima [5].

Uno de los aspectos positivos está basado en las ventajas que ofrece el ahorro energético. Los indicadores económicos permiten concluir que ahorrar energía cuesta menos que pagar un suplemento adicional por ella y por otra parte al pagar la inversión en la instalación de la infraestructura con los ahorros de energía se suprime el capital de riesgo.

Otro de los enfoques que se deben seguir es el de combinar una mayor eficiencia energética con un uso más intensivo y extensivo de fuentes de energía renovables de última generación.

En este sentido se cuenta con esfuerzos sostenidos que son significativos, por ejemplo en 2007 USA invirtió en incrementos de la eficiencia energética y en energías renovables un equivalente a la ganancia neta de ese año de Walmart de Exxon Movil y de General Motors [6].

En relación con el tema de las energías renovables se cuenta con diversas experiencias que han sido exitosas. A continuación mencionaremos algunas que han demostrado ser las más significativas.

El edificio de Google en Mountain View (California) ha sido un ícono en el sector por su contribución a las energías renovables, cuenta con la mayor área corporativa de celdas solares. La empresa Voltaix que fabrica partes para las celdas solares creció desde 2008 en medio de la depresión financiera de ese año y en solo cinco años alcanzó un incremento en su valor del 450%.

El uso de la energía geotérmica, debido en parte a que depende de condiciones geológicas y atmosféricas muy particulares, ha sido una opción menos generalizada que la eólica y la fotovoltaica no obstante, aun con esas limitaciones es utilizada hoy en más de 50 países.

El caso emblemático de ese tipo de energía alternativa es el de Islandia que es una isla volcán donde llueve mucho, pero no obstante a pesar de esa ventaja natural solo usan el 20% de la capacidad potencial de ese recurso energético y aunque es considerada el prototipo de país para el uso de esta fuente de energía ocupa el puesto 14° del mundo, los Estados Unidos ocupa el primer lugar debido a su riqueza de fuentes geotérmicas aunque todavía hay muchas de ellas que no han sido explotadas por su riesgo sísmico [7].

La energía mareomotriz que se genera a partir de las olas y las mareas es otra opción viable en algunas costas de ciertos países del mundo, la primera "hacienda de olas" a nivel mundial se construyó en Portugal y se espera que pueda cubrir un 30% del consumo de ese país en el 2050 [8].

Sin embargo, otras opciones que en el pasado se vendían como una panacea para cubrir los requerimientos energéticos del planeta, como es el caso de la energía nuclear, se encuentran hoy en declive en varios países y un caso emblemático es el

de Alemania. Las centrales nucleares se están desmantelando no solo por el peligro potencial que representan, debido al tipo de material que consumen, algo que se hizo evidente con los desastres nucleares en Rusia y en Japón en el pasado, sino también debido a otras razones de corte económico.

Construir una central nuclear y lograr que se haga operativa tarda en promedio diez años. Además esta tecnología en el largo plazo termina por ser un recurso limitado por la cantidad del material radioactivo disponible en el planeta.

Otro de los problemas que ocasiona la energía nuclear se relaciona con la contaminación de las aguas de refrigeración del reactor que es mas de naturaleza térmica que química y por otra parte siempre existen riesgos con la disposición de los materiales de desecho de los reactores cuyo manejo le han costado a los Estados Unidos y a la Unión Europea el equivalente de lo que costó la guerra de Vietnam y la carrera espacial juntas [9].

En términos de los niveles de emisión de gases de efecto invernadero, el sector industrial al que muchas veces se le ha considerado el gran villano de la partida contribuye solo con el 18% de las emisiones totales, mientras que el sector de transporte aporta casi el doble de ese valor con un 34%; sin embargo, sorprende que el primer lugar lo ocupe el sector de la vivienda y de los locales comerciales con el 48% [10].

Debemos resaltar que en este panorama no está incluida la contribución del sector agrícola y la ganadería (más de 1/3 del total de las emisiones mundiales) con sus efectos devastadores asociados con la deforestación de las tierras vírgenes de reserva de muchos ecosistemas

“protegidos” , tema sobre el cual se comentará más adelante en este artículo.

Las Organización de las Naciones Unidas publico en el año 2007 un reporte donde se indica que por primera vez más gente vive en las áreas urbanas que en los sectores rurales. Esta tendencia ha seguido en aumento en la siguiente década y se espera que supere el 70% de la población mundial para el año 2050. En continentes muy poblados como Asia se mudan a las ciudades más de un millón de personas cada semana [11].

Según comentamos en los párrafos anteriores el gasto de energía domiciliario y el comercial representan uno de los componentes más significativos del problema energético. En este sentido un enfoque que cada vez gana más adeptos es el tema de los edificios verdes.

Las ventajas de este tipo de edificaciones “verdes” en cuanto al ahorro energético y a otros aspectos relacionados con el ambiente son promisorios. Pueden abastecerse de energía solar todo el año , en la mayor parte de los casos se busca emplear materiales locales que no sea tóxicos , se promueve la colecta agua de lluvia y el tratamiento y la reutilización de las aguas servidas y muchos cuentan con jardines donde se pueden cultivar plantas comestibles.

El balance del gasto de energía de este tipo de edificaciones es muy atractivo en términos ambientales y económicos, reducen hasta en un 30% la emisión de carbono y en 35% el consumo de agua y el resto de los gastos generales en un 50%. Aparte se aumenta el valor de inmueble en varios rubros, la tasa de ocupación en un 7%, el precio del alquiler en un 5% y el precio de venta del inmueble hasta en un 10% por cada metro cuadrado. Si se utiliza fuentes de luz

natural en esos inmuebles se generan otros beneficios adicionales por la mejora de la eficiencia en el trabajo [2].

Según el tipo de negocio y en especial para aquellos que involucran las tecnologías modernas se considera que en términos de costos los empleadores pagan hasta 100 veces más por el personal que tienen contratado que por la energía que consumen y por ende el incremento en la eficiencia del factor humano se refleja en considerables ganancias para la empresa [2].

En relación con el sector del transporte que como vimos ocupa el segundo lugar en las emisiones de carbono se estima que para el 2035 el planeta cuente con una flota de vehículos que superará los tres mil millones de unidades (contando carros, camiones y motos). Ese incremento requiere de cuatro veces más espacio en las vías de tránsito y en el área de estacionamiento, se necesita más materia prima para su construcción y por supuesto de combustible lo que genera cantidades considerables de CO₂ en la atmósfera.

En China solo el 6% de su población dirige algún tipo de vehículo esto representa hoy todo el parque automotor con que contaban los Estados Unidos en 1920. La proyección para China es que para 2050 cuente con el mismo número de carros que existen hoy en todo el mundo [12].

Aparte de su importante contribución al CO₂ el sector de transporte produce 50% del monóxido de carbono, el 30% de los NO_x y el 25% de los hidrocarburos que se liberan a la atmósfera por la combustión [13].

En los Estados Unidos la compra y el mantenimiento de un carro consume entre el 15 y el 25% del ingreso promedio de

sus ciudadanos y ocupa el segundo lugar de gastos en el presupuesto familiar después de la vivienda y antes que la comida. Un elemento que es importante tomar en cuenta es que el 75% de los carros que circulan en el planeta los ocupan una sola persona. Cualquier esfuerzo que se pueda efectuar en la dirección de optimizar el uso de los vehículos en sentido de incrementar el número de pasajeros por vehículo se reflejará considerablemente en un aumento significativo en la eficiencia [14].

La agencia para protección del ambiente, EPA de los Estados Unidos en el 2010 fijó cuotas promedio a la industria de automóviles para sus flotas con un mínimo de rendimiento de 15 Km/Litro, las proyecciones estimaban que si se podía lograr ese valor hacia el 2016 el incremento en la eficiencia a lo largo de la vida de los vehículos equivaldría a retirar de circulación 50 millones de carros hasta el 2030. Sin embargo ni aun con la contribución de los vehículos híbridos ni probablemente con la promesa que proyectan los carros movidos exclusivamente por baterías de litio se podrá lograr esa meta [14].

Otro tipo de estrategia que se va incrementando en los últimos años es la de la empresa UbiCar y otras similares que ofrecen a sus clientes puestos vacantes lo que se refleja en precios de taxis más solidarios. Hay empresas que incluso le pagan a sus empleados por no estacionar el vehículo en los puestos de parqueo que le fueron asignados [15].

Por más esfuerzo que realicemos en incrementar la eficiencia energética de los motores de los vehículos con que nos desplazamos y los que empleamos para transportar los productos y las materias primas no llegaremos a lograr un equilibrio

con el ecosistema global si no racionalizamos el sistema de transporte en su conjunto.

El planeta no podrá seguir tolerando por más tiempo la relación de un humano por vehículo ni tampoco el costo del traslado de alimentos “exóticos” de un extremo al otro del planeta. Parece absurdo que un salmón que se cría en los estanques de Canadá sea fileteado y envasado en China para ser vendido en Nueva York. Es evidente que hemos cometido algún error de fondo en nuestra interpretación de lo que debe significar la globalización, no solo desde el punto de vista del consumo de energía sino de la propia fuente para nuestra alimentación.

III. Cultivando un mundo mejor

El programa de las Naciones Unidas para el desarrollo advierte que muchos de los sistemas agrícolas entrarán en colapso a medida que los patrones atmosféricos cada vez se tornen más variables e impredecibles, lo que dejará a un gran número de personas en niveles alarmantes de desnutrición. Asimismo, habrá vidas que se van a perder cada año debido a los denominados “desastres naturales” y que son en buena medida otra de las consecuencias del cambio climático.

Michael Pollan quién es autor del libro *El Dilema del Omnívoro* cita en su texto que en 1940 se producían 2.3 calorías de alimento por cada caloría de combustible fósil gastado, hoy por cada caloría de alimento se gastan 10 calorías de combustible. El incremento de la temperatura del planeta ocasiona un descenso en la capacidad productiva agrícola, como ejemplo se ha determinado que por cada grado (°C) que sobrepasa el valor óptimo para la producción de trigo y de otros cereales causa una caída en la producción del cultivo de un 10%. En 2010

el año más caliente registrado hasta ahora la producción mundial de trigo bajó en un 70% a causa de inundaciones en varios países productores y en especial por la sequía que se presentó en Rusia [2].

El proceso de convertir tierras en áreas agrícolas libera la misma cantidad de CO₂ que se produce al año en los Estados Unidos. Limpiar el terreno para la agricultura y el ganado es responsable del 97% de la deforestación en América Latina y de más del 90% en el Africa subsahariana y en el sureste de Asia [16].

La producción y comercialización de productos alimenticios en Norteamérica utiliza hasta un 20% del combustible fósil, lo que equivale al consumo total de energía de Francia. Solo un 20% de esa energía se traduce directamente en calorías de alimento, el resto del proceso se distribuye con un 28% en los fertilizantes y un 34% en la siembra y la colecta motorizadas a la que se suma la distribución hasta el punto de venta lo que consume hasta un 18% adicional [17].

Criar animales de hacienda es otro de los factores que inciden en el calentamiento global siendo responsable del 18% del efecto invernadero que produce el sector pecuario. La mitad de las tierras de cultivo en el mundo se usan para alimentar ganado con cereales y otros granos de diverso tipo y en particular con las semillas de plantas oleaginosas como la soya, En 2008 en Los Estados Unidos usaron el 70 % de su producción de granos para producir carne proveniente de distintas fuentes animales [18].

Como se evidencia en los párrafos anteriores, hemos desarrollado una marcada tendencia a nivel mundial hacia la “industrialización” de la agricultura de los monocultivos que se gastan en su mayor proporción en la alimentación

animal y no en la humana. El costo de remontar la pendiente de la escala trófica ha sido no solo exorbitante sino también ineficiente. Criamos animales en sistemas confinados bajo un régimen de alimentación que los vuelve obesos para luego alimentarnos de ellos y volvernos obesos también.

Otro de los factores que hay que tomar en cuenta es que el exceso de fertilizantes causa un sobre actividad en los microorganismos del suelo y estos producen un mayor nivel de compuestos NOx que a su vez generan un efecto de estufa y un daño considerable a la capa de ozono.

Una alternativa que vale la pena tomar en cuenta y explorar son los célebres cultivos orgánicos, de moda en estos últimos tiempos. Este tipo de cultivos producen más micorrizas por área de siembra lo que potencia la fijación del N₂ de la atmósfera y a su vez liberan menos NOx [19]. Por otra parte permiten lixiviar el agua con mayor facilidad y retienen hasta 20 veces su peso en agua y si la propagación del cultivo se hace mediante la siembra directa disminuye hasta en un 30% el costo de los fertilizantes [20]. El abuso de la agricultura industrial ya creó 60 zonas muertas en los mares del mundo debido a la eflorescencia de algas tóxicas que causan un déficit importante de O₂ en el agua salada y matando en consecuencia muchas especies marinas.

Debemos admitir que una de las limitaciones de este tipo de cultivo es su precio de venta al público, los cultivos orgánicos se suelen vender hasta por tres veces el valor del producto de tipo industrial [21].

Otro de los esfuerzos por redirigir el sector agrícola hacia una ruta más sostenible van orientados hacia la producción de

biocarbón un material que se puede obtener a partir de los desechos forestales empleando medios muy sencillos mediante las tecnologías apropiadas, sin embargo todavía en la mayoría de los países del tercer mundo el método que se usa es muy ineficiente, debemos resaltar que más de un tercio de la población mundial todavía queman madera para cocinar. El peligro que involucra el crecimiento de esta tecnología simple es que el material de partida al igual que la madera depende de los bosques que ya se encuentran en marcado declive por diversas razones [22].

Según el Instituto Nacional de Salud de los Estados Unidos cuatro de cada seis muertes en ese país están asociadas a una mala alimentación y a la contaminación de los alimentos y del ambiente por pesticidas y otros tipos de productos químicos tóxicos, entre ellos los que se liberan de muchos recipientes plásticos que utilizamos a diario. Uno de cada 17 niños menores de 3 años sufre hoy de algún tipo de alergia alimentaria. En los Estados Unidos en un lapso de cinco años ocurrió un aumento del 265% en las hospitalizaciones por alergia alimentaria. Si esto sigue así el costo en sistemas de salud que ya de por sí es muy elevado alcanzará un valor enorme y será insostenible para todas las naciones no solo en el caso de los países del tercer mundo [23].

Michael Pollan, a quien ya mencionamos antes plantea a modo de reflexión el hecho de que a partir del fin de la segunda guerra el gobierno de USA incentivó el uso del nitrato de amonio que se producía en grandes cantidades y que ya no podían gastar en las bombas para ser aplicado a mansalva en el sector agrícola como fertilizante , un efecto de reingeniería parecido se logró también con la

conversión de la industria militar que producía el gas nervioso y que pasó a transformarse en un comienzo en una incipiente industria de los pesticidas. En 1945 el 5% del fertilizante nitrogenado era de origen sintético hoy representa el 95% [24].

El Capitalismo Climático se expresa de formas diversas y se basa en dos principios generales: a) Ganar tiempo usando todos los recursos que ya disponemos de la manera más eficiente que sea posible y hacerlo hoy de la forma más eficaz en que podamos, proporcionando los mayores retornos a los inversores que nos apoyen en el proyecto y b) Debemos redefinir nuevas formas de como fabricamos y distribuimos los productos y los servicios empleando nuevos conceptos como la Biomimética y la Economía Circular entre otros. Inclusive a los niveles macro y microeconómico los sistemas creados por el hombre deberían imitar a la naturaleza en las formas como se administran los ecosistemas en términos de su diversidad, capacidad de adaptación, resiliencia y autosuficiencia.

Podemos considerar la problemática que se plantea con la producción y el consumo de nuestros alimentos y de los que consumen los animales de cría en otros términos que involucran a nuestra biología.

La naturaleza no es ni actúa como una máquina, es un sistema complejo no lineal que opera bajo un esquema de redes interconectadas y todo lo que afecta a una parte de esa red se transmite a todo el sistema.

La evolución biológica y social del *homo sapiens* a lo largo de la mayor parte de su historia nos condujo a adaptarnos a un tipo de alimentación (igual para otras especies) y a limitar el número de individuos que

constituían los grupos sociales creándose pequeñas comunidades dependientes de la agricultura y de la cría de animales de corral.

No podemos pretender de la noche a la mañana que en un par de siglos pueda adaptarse nuestra fisiología y bioquímica a un esquema de sociedad que recuerda a la de los insectos grupales como las termitas. Es imperativo hacer un esfuerzo por dimensionarnos dentro de una escala que sea más humana.

IV. Adaptarse al caos del clima

Algunos expertos en el clima piensan que cambiar la mitigación por la adaptación es como admitir una derrota. John Holdren quien fuera asesor en el gobierno de Obama mantiene una visión más realista en relación con en el tema del clima y dice que solo hay tres opciones: mitigar la emisión, adaptarse al cambio climático y sufrir las consecuencias y tendremos que aceptar las tres, el problema está en cuál debería ser la mezcla idónea porque cuanto más se tome de cada una se rebajará de la otras [25].

Las pérdidas en la infraestructura y los servicios por causa de los desastres naturales han sido cuantiosas en la última década y la tendencia que se observa es la de que se incrementen las consecuencias dañinas del cambio climático.

Como mencionamos, en 2005 Katrina costó 200 millardos de US\$ lo que representó un gasto equivalente al de las guerras de Irak y de Afganistán juntas. Ante ese desastre las empresas de seguros afrontaron el pago de más de 60 millardos en indemnizaciones, el huracán se llevó la vida de por lo menos 2000 personas que fueron confirmadas sin contar los desaparecidos y ocasionó un daño irreparable a más de 360 mil viviendas. Ban Ki-moon quien fue secretario de la

Naciones Unidas llama a las inundaciones los tsunamis en cámara lenta [26].

En el informe *El Costo del Cambio Climático* publicado por el Consejo de Defensa de los Recursos Naturales de los Estados Unidos se publicó que el costo en ese país de los sistemas de aire acondicionado superará en el mediano plazo los 200 millardos de dólares, de forma de poder costear la electricidad adicional y los nuevos equipos de aire acondicionado mientras que a modo de comparación se espera que ocurra una reducción del orden de los 60 millardos en los gastos de calefacción. Los calentones de 2003, 2006 y 2007 obligaron a varios reactores nucleares a cerrar porque no podían ser enfriados de forma eficiente según las normas de seguridad que exige la Comisión Internacional de Energía Atómica [27].

Otro aspecto que vale la pena considerar es el turismo, una fuente de ingreso y de empleo para muchas naciones. Este rubro de la economía mundial representó el 3.4% del PNB mundial en el 2010 sin contar el aporte de los empleos indirectos, si se incluye ese componente su contribución puede alcanzar hasta un 15% del PNB mundial [28].

Los efectos del calentamiento global son críticos en ciertas locaciones como los países donde se practican deportes de invierno. La olimpiada de invierno de Vancouver de 2010 la llamaron las “olimpiadas de primavera”, se llegó al extremo de que las estaciones de esquiar tuvieron que mandar a fabricar nieve y repartirla desde helicópteros en una serie de sitios claves de las competencias.

Si la tendencia sigue así, solo Suiza y ciertos lugares localizados a más de 1500 metros de altura se salvarán por ahora de los efectos colaterales del calentamiento

global. De cristalizarse esa amenaza daría al traste con el 65% de las pistas de esquí actuales. Existe la alternativa de producir nieve artificial pero es una tecnología que demanda de mucha energía y de grandes cantidades de agua, dos insumos que no sobran hoy en día, una de cada 8 personas en el mundo no tiene acceso al agua potable y los efectos de la sequía están empeorando [29].

Empresas como Innovative Water Technologies una firma canadiense utiliza la energía solar para purificar el agua, sus dispositivos permitieron suplir de agua potable a 5000 personas cada día en Haití después de ocurrir la tragedia del sismo. En ese mismo país la World Wide Shelters desarrolló un sistema de refugios para personas ubicadas en las áreas del desastre que cubrían casi toda la nación [30].

La carencia de alimentos y de agua potable, dos de los elementos que se suman al de los conflictos bélicos, ocasiona cada vez con mayor frecuencia la migración forzada de un número considerable de personas.

El panel intergubernamental para el cambio climático presidido en sus inicios por Al Gore estimó que para 2050 existirán más de 150 millones de refugiados a causa de los cambios en el clima, con el impacto social, económico y político que esto implica sumándose a los trágicos desplazamientos de personas que causar la guerra en el medio oriente y en otros territorios como en el África subsahariana [31].

Sin embargo no todos se lamentan de los efectos del calentamiento global, entre ellos los habitantes de Groenlandia porque entre otras razones les fue más fácil encontrar nuevos yacimientos de petróleo en su territorio como consecuencia del

deshielo. Hoy es posible navegar por el legendario Paso del Noroeste casi todo el año.

Se pensaba que en otros territorios septentrionales como es el caso de Rusia y de Canadá el efecto del calentamiento global supuestamente sería benéfico porque mejoraría las cosechas, no obstante lo que se observó fue el efecto contrario. En el 2010 los incendios en Rusia fueron devastadores causados en gran parte la peor sequía en 1000 años, causaron 15000 muertes y un costo equivalente a los 15 millardos de dólares estadounidenses [32].

V. Perfiles hacia un futuro posible

Michael Porter renombrado profesor de la escuela de negocios de Harvard sostiene que los dirigentes precisan comenzar a reconocer que las mejoras ambientales son una oportunidad económica y competitiva para las empresas [33].

Ya es hora de adherirnos a la lógica de una nueva visión económica que era silente hasta este momento pero que surge con ímpetu y lo hará todavía más en los años por venir y que se asocia estrechamente con la preservación del medio ambiente con una mayor productividad y que a su vez considere como uno de sus motores a la innovación con miras al desarrollo de la competitividad en los mercados globales.

Los mismos abusos del capitalismo que hizo que la economía global colapsara en el 2008 se encuentran por detrás de otro posible “*cisne negro*” el inminente colapso de los sistemas que sustentan la vida en nuestro planeta y de los cuales en última instancia todos dependemos.

La finalidad de los indicadores económicos como el Producto Nacional Bruto es la de mostrar cuan sana está la economía de un país y se crea una fuerte preocupación cuando cae su valor. La idea que se

promulga con frecuencia en el público en general es que debemos estar felices cuando sube y preocuparnos cuando cae.

En realidad el PNB lo que mide es el flujo de dinero y es una medida indirecta de cuántas cosas materiales poseemos y por ende de la magnitud del dinero que cambia de manos mediante las transacciones económicas. La conclusión *a priori* es que cuanto más dinero se gasta es porque más dinero se posee y mejor debería encontrarse nuestra situación económica en general. La utilidad del indicador PNB ha sido cuestionada desde su invención en la década de 1930, sin embargo es absurdo referir el bienestar de una nación al menos solo en base a un indicador de la renta nacional como el PNB.

Los pueblos del mundo saben que el cambio climático es una cuestión vital de supervivencia. En 2010 el banco HSBC realizó una encuesta entre 15000 consumidores de 15 países que agrupan a más del 50% de la población del planeta y encontraron que los asuntos relacionados con el impacto del cambio climático constituyen una de las tres mayores causas de preocupación entre la población, alcanzando casi el mismo nivel que la estabilidad económica y que el terrorismo [34].

Hasta ahora uno de los objetivos de la economía pareciera que ha sido honrar al principio de Pareto, enriquecer al 20% de la población que posee más del 80% de la riqueza mundial, muchas veces a costa de la miseria del resto de la humanidad. Este concepto parecía ser algo extraño para la mayoría de los economistas hasta el año 2009 cuando los premios Nobel de economía Joseph Stiglitz y Amartya Sen reunieron un panel con otros laureados y concluyeron que se debían plantear siete

indicadores o categorías para medir el bienestar de los ciudadanos: salud, educación, ambiente, empleo, bienestar material, relaciones interpersonales y participación política. [35]

Los laureados con el Nobel llegaron a la conclusión de que cualquier nación que tome en serio el concepto de progreso debe comenzar por considerar no solo la distribución de las riquezas materiales sino también la de otros bienes sociales algunos de naturaleza intangible como el nivel de felicidad entre toda la población y el grado de la sustentabilidad económica y ambiental.

Adam Smith en el libro *La Riqueza de las Naciones* es citado con frecuencia por los defensores del libre mercado, en el libro el autor aclara que los mercados operan con recursos escasos y con eficiencia en el corto plazo y que eso era todo para lo que ellos habían sido concebidos. Los mercados nunca tuvieron la intención de cuidar de las generaciones futuras, esa es nuestra función, la de cuestionar en qué tipo de mundo queremos vivir y cual le queremos dejar a las generaciones por venir. Posiblemente Smith no solo fue el progenitor del mercado sino también el del concepto de sostenibilidad.

Ya es hora de que los economistas vuelvan a leer *La Riqueza de las Naciones* y liberen a los mercados del sector energético del mal del socialismo corporativo que aplica subsidios irracionales que hacen que la energía parezca más barata de lo que realmente es, tanto para nosotros como para la tierra. Además de la sustentabilidad económica y ambiental hay un tercer factor que es muy importante en la opinión de muchos ciudadanos y es la imperativa necesidad de lograr la equidad en la distribución de la riqueza y en el acceso a los bienes y servicios.

David Brower uno de los mayores ambientalistas de nuestra época acostumbraba preguntar ¿Cómo queremos que sea el futuro de aquí a 50 años?

“Vamos a soñar un poco y a mirar alto, desde hace siglos los navegantes miran las estrellas y aunque hasta ahora nunca alcanzaron una, tal vez por el hecho de que miraron alto fue que alcanzaron su camino. Hacer ese milagro es posible, se necesitan líderes en diferentes sectores de nuestras sociedades y el verdadero liderazgo involucra una cuota de coraje extraordinario por parte de las personas comunes” [36].

VI. Conclusiones

Debemos de tratar de ser más pragmáticos que la visión idealista que nos ofrece David Brower en el párrafo anterior. No se trata de hacer milagros sino de cumplir con una serie de pautas que por negligencia o ignorancia postergamos demasiado tiempo. Entre esas posibles pautas y criterios podríamos considerar las siguientes:

Llegar a convencernos de que el beneficio que nos han brindado los ecosistemas naturales es un capital que debemos invertir pero que también se debe capitalizar para incrementar su rendimiento, además de preservar su patrimonio para las generaciones futuras en el mediano y el largo plazo. La preservación del medio ambiente no es necesariamente un gasto se puede convertir en un negocio lucrativo.

La energía no es un recurso barato, hay que pagar un precio justo por ella sea por la vía de la inversión en fuentes alternativas y/o la de sincerar la economía de los subsidios ofreciendo cuotas de primas por la reducción de emisión de carbono un recurso de aplicación cada vez más frecuente.

Considerando que nuestro medio ambiente se tornará cada vez más agresivo nos veremos obligados a incrementar la inversión en la prevención de desastres naturales y en sistemas capaces de resistir su impacto.

El proceso de adaptación al cambio climático no es una opción de carácter mágico, para resolver los problemas que enfrentamos hoy en día debemos reducir racionalmente el consumo de los recursos de todo tipo y en especial los que no son renovables.

Por último no podemos olvidar que no existirá un futuro viable sin tomar en cuenta otros dos elementos: la educación de la población y la equidad en la distribución de los bienes y servicios.

VII. Referencias

- [1] Brown L.; Larsen J; Dorn J. y Moore F. (2008) *El momento del Plan B*. Earth Policy Institute. Disponible en: http://www.earthpolicy.org/datacenter/pdf/80by2020_spanish.pdf
- [2] Taleb N. (2008) *El Cisne negro. El impacto de lo altamente improbable*. Editorial Paidós. Barcelona. Reseña del libro. Disponible en:
- [3] <http://pepsic.bvsalud.org/pdf/rpsua/v1n2/v1n2a7.pdf>
- [4] Lovins H. y Cohen B. (2013). *Capitalismo Climático* Editorial Cultrix.
- [5] International Energy Agency World Energy Outlook 2009. Directorio de la IEA disponible en: <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weo/website/2009/WEO2009.pdf>
- [6] Carbon Disclosure Project CDP Overview 2008. Disponible en: www.escinst.org/pdf/CPD.pdf
- [7] The 100 Most Sustainable Corporations in the World. Disponible en: <http://www.corporateknights.com/reports/global-100/>
- [8] Bob Willard (2002). *The Sustainability Advantage*. New Society Publishers 2002: Disponible en:
- [9] www.sustainabilityadvantage.com
- [10] Mims Christopher (2009). *Iceland's Geothermal Bailout*. Popular Science 19 Jun. 2009. Disponible en: www.popsci.com/environment/article/2009-06/icelands-powerdown-below
- [11] Salmond Alex (2009). (Primer ministro de Escocia) Congreso Mundial de Energías Renovables Glasgow. Escocia Jul. 2008.
- [12] Publicado en Green Jobs Nov 2009
- [13] Severance. Business Risks and Costs of new Nuclear Power. American progress Ene. 2009
- [14] Transportation and Economic Prosperity Surface transportation Policy Project Disponible en: www.transact.org/library/factsheets/prosperity.asp
- [15] www.transact.org/library/factsheets/prosperity.asp
- [16] Gorrie Peter (2008). *China's Green Leap* Forward Toronto Star Mar 2008
- [17] Gott Phillip (2008) Demand for Cars and trucks to Quadruple at Current Trends by 2035: Is Mobility as WE Know It Sustainable? Disponible en: <https://newatlas.com/3-billion-cars-on-the-road-by-2035-is-mobility-as-we-know-it-sustainable/9487/>
- [18] Environmental Protection Agency (EPA) National Emissions Inventory average 1970- 2008. Disponible en: www.epa.gov/ttn/chieftrends
- [19] Savage Sam. Global Transport Sector Meets to Discuss Greenhouse Gas redOrbit Ene 2009. Disponible en: www.redorbit.com/news/science/1623956/global_transport_sector-meets-to-discuss_greenhouse_gas
- [20] www.redorbit.com/news/science/1623956/global_transport_sector-meets-to-discuss_greenhouse_gas
- [21] Drivers of Deforestation . Disponible en: http://rainforests.mongabay.com/deforestation_drivers.html
- [22] U. S. Agriculture and Forestry Greenhouse Gas Inventory 1990-2005. Disponible en: https://www.usda.gov/oc/climate_change/AFGGInventory1990_2005.htm
- [23] Union of Concerned Scientists. Hidden Costs of Industrial Agriculture. Disponible en: https://www.ucsusa.org/food_and_agriculture/our-failing-food-system/industrial-agriculture/hidden-costs-of-industrial.html#.WoX4QdSF5kg
- [24] Mark Shepard et al. An Assessment of de Environmental Impacts of Organic Farming. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Mark_Shepherd5/publication/237799525_An_assessment_of_the_environmental_impacts_of_organic_farming/links/53f18c220cf23733e815bb9b/An-assessment-of-the-environmental-impacts-of-organic-farming.pdf
- [25] https://www.researchgate.net/profile/Mark_Shepherd5/publication/237799525_An_assessment_of_the_environmental_impacts_of_organic_farming/links/53f18c220cf23733e815bb9b/An-assessment-of-the-environmental-impacts-of-organic-farming.pdf
- [26] [_of_the_environmental_impacts_of_organic_farming/links/53f18c220cf23733e815bb9b/An-assessment-of-the-environmental-impacts-of-organic-farming.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mark_Shepherd5/publication/237799525_An_assessment_of_the_environmental_impacts_of_organic_farming/links/53f18c220cf23733e815bb9b/An-assessment-of-the-environmental-impacts-of-organic-farming.pdf)
- [27] Union of Concerned Scientists. Agricultural Practices and Carbon Sequestration Disponible en: <https://blog.ucsusa.org/andrea-basche/soils-to-reverse-climate-change-what-do-we-know-about-carbon-farming-practices>
- [28] Agricultura Orgánica: una herramienta para el desarrollo rural sostenible y la reducción de la pobreza (2003). Memoria de Taller realizado del 19 al 21 de mayo en Turrialba, Costa Rica Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-at738s.pdf>
- [29] International Biochar Initiative, Whats Is Biochar? Biochar Is a Valuable Soil Amendment. Disponible en: [www; biochar- international.org/biochar](http://www.biochar-international.org/biochar)

- [30] Michael Pollan (2008) Farmer in Chief New York Times publicado el 9 de octubre de 2008. Citado por Lovins H. y Cohen B. (2013)
- [31] John A. Harrison The Nitrogen Cycle Of Microbes and men. Vision learning. Disponible en: <http://nsdl.oercommons.org/courses/the-nitrogen-cycle-of-microbes-and-men-2/view>
- [32] John Holdren Disponible en: https://ia802705.us.archive.org/23/items/Ecoscience_17/JohnHoldren-Ecoscience.pdf
- [33] Justin Gillis (2010) In Weather Chaos , a case for de Global Warming new York Times 14 Ago 2010. Disponible en: <http://www.nytimes.com/2010/08/15/science/earth/15climate.html?pagewanted=all>
- [34] Nuclear Power Can't Stand the heat, Public Citizen
- [35] Disponibelen: <https://www.citizen.org/sites/default/files/hotnukesfactsheet.pdf>
- [36] International Ecotourism Society Fact Sheet Global Ecotourism Disponible en: www.ecotourism.org/site/c.orLQXPCLMF/b.4835303/k.BEB9/What_is_Ecotourism_International_Ecotourism_Society.html
- [37] Water Crisis to Be the Biggest World Risk
- [38] .Telegraph 5 Jun 2008. Disponible en. <http://www.telegraph.co.uk/finance/newsbysector/utilities/2791116/Water-crisis-to-be-biggest-world-risk.html>
- [39] Altamirano Rúa T. (2014). *Refugiados Ambientales. Cambio climático y migración forzada*. Fondo Editorial. Universidad Católica del Perú. Disponible en: https://www.comillas.edu/images/OBIMID/refugiados_ambientales.pdf
- [40] Lovgren, S (2005) Climate Change Creating Millions de Eco refugees,UN Warns, National Geographic Nov 2005. Disponible en: https://news.nationalgeographic.com/news/2005/11/1118_051118_disaster_refugee.html
- [41] Tobis Michael (2010) Moscow Doesn't Believe in This Disponible en: <http://initforth-egold.blogspot.com/2010/08/Moscow-doesn't-believe-in-this.html>
- [42] en. <http://initforth-egold.blogspot.com/2010/08/Moscow-doesn't-believe-in-this.html>
- [43] egold.blogspot.com/2010/08/Moscow-doesn't-believe-in-this.html
- [44] Porter M. (2007) Disponible en: <http://www.ferrovial.com/es/prensa/noticias/las-empresas-deben-afrontar-el-cambio-climatico-de-forma-inmediata-segun-un-experto-de-la-universidad-de-harvard/>
- [45] -empresas-deben-afrontar-el-cambio-climatico-de-forma-inmediata-segun-un-experto-de-la-universidad-de-harvard/
- [46] HSBC Climate Confidence Monitor 2010. Disponible en: <https://www.theclimategroup.org/sites/default/files/archive/files/HSBC-Climate-Confidence-Monitor-2010.pdf>
- [47] <https://www.theclimategroup.org/sites/default/files/archive/files/HSBC-Climate-Confidence-Monitor-2010.pdf>
- [48] Monitor-2010.pdf
- [49] Stiglitz Joseph y Sen Amartya. Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/118025/118123/Fitoussi+Commission+report>
- [50] Brower David . Disponible en: <https://browercenter.org/about/who-was-david-brower/>

NOTA: La consulta de las fuentes digitales fue actualizada en febrero de 2018