

# Evaluación de Puntos Críticos Aplicado al Proceso de Empaque de Lima Persa.

**RESUMEN:** La región de Martínez de la Torre, Veracruz, depende económicamente de la producción y exportación de Lima Persa debido a la calidad de la fruta.

Por lo que un adecuado tratamiento de inocuidad y calidad de Lima Persa en las plantas empacadoras de cítricos es de vital importancia, ya que la disponibilidad de buena calidad alimentaria es un reclamo a nivel nacional e internacional. La inocuidad alimentaria se puede entender como la importancia de medidas que reducen los riesgos. El objetivo del estudio fue implementar un análisis de Modo y Efectos de Falla (AMEF) en el Proceso de Empaque de Lima Persa en una Empacadora de la región, para conocer la forma de operación de cada parte del proceso de tratamiento postcosecha e identificar el Modo y Efecto de Fallo, por consiguiente determinar los puntos críticos de control y tomar las acciones correctivas en cada área para un aseguramiento de la calidad e inocuidad de la fruta.

Se realizó el análisis de riesgo para cada operación de acuerdo a la frecuencia de severidad, la ocurrencia y detección de fallas, posteriormente se calculó el número de riesgo, y se obtuvo como resultado con número de riesgo mayor la operación de sanitizado y túnel de secado, ya que presentan más de un modo de falla potencial, por la cual se genera ineficiencia en la desinfección, hongos y deshidratación que afectan directamente la inocuidad y la calidad de la Fruta, por lo que como acción correctiva se incluyó un Sistema de Control Automatizado.

**PALABRAS CLAVE:** AMEF, Proceso de empaque, Lima Persa.



**Colaboración**

Rosalía Aguirre Solano; Priscila González Rosales,  
Instituto Tecnológico Superior de Misantla

**ABSTRACT:** The region of Martínez de la Torre, Veracruz, depends economically on the production and export of Persian Lima due to the quality of the fruit.

So an adequate treatment of innocuousness and quality of Persian Lima in citrus packing plants is of vital importance, since the availability of good food quality is a national and international claim. Food safety can be understood as the importance of measures that reduce risks. The objective of the study was to implement an analysis of Mode and Effects of Failure (AMEF) in the Packing Process of Lima Persa in a packinghouse in the region, to know the way of operation of each part of the post-harvest treatment process and identify the way and Effect of Failure, therefore determine the critical control points and take the corrective actions in each area for an assurance of the quality and innocuousness of the fruit.

The risk analysis was performed for each operation according to the frequency of severity, the occurrence and detection of faults, the risk number was subsequently calculated, and the operation of sanitizing and drying tunnel was obtained as a result with a higher risk number. , since they present more than one mode of potential failure, which generates inefficiency in disinfection, fungi and dehydration that directly affect the safety and quality of the fruit, so as corrective action was included an Automated Control System .

**KEYWORDS:** AMEF, Packaging process, Persian Lima.

## INTRODUCCIÓN

Derivado de los esfuerzos internacionales para hacer frente Existe una creciente necesidad por parte de la industria alimentaria mundial y los consumidores de mantener altos estándares de calidad, que permitan el acceso a alimentos cada vez más inocuos [1].

Esta tendencia no solo posee un enfoque dirigido al mejoramiento de la salud pública.

La importancia de mantener parámetros estrictos que garanticen la calidad de los sistemas productivos y los alimentos manufacturados se vislumbra cada vez más palpable, ya que se considera que las alteraciones en las condiciones de calidad e inocuidad de los alimentos es uno de los problemas de salud pública distribuidos a nivel mundial de forma muy amplia [2].

El crecimiento esperado de la población humana a un valor cercano a los nueve billones de personas para el 2050 permite predecir que la inocuidad alimentaria será un parámetro importante en las próximas décadas, que incidirá en el mejoramiento de los índices y de las políticas de salud, así mismo, influirá en el crecimiento económico de los países, principalmente en aquellos en vías de desarrollo [3].

Las técnicas de análisis de riesgo son empleadas en la búsqueda y evaluación de escenarios que pueden representar un impacto adverso para una instalación o planta de proceso, identificando los escenarios de mayor riesgo y emitiendo acciones de recomendación tendientes a minimizar el mismo. El principio de cualquier estudio de riesgo, está basado en encontrar respuesta a tres interrogantes: 1) ¿Qué puede salir mal? 2) ¿Qué tan frecuente es? y 3) ¿Cuáles son sus efectos?, analizando y entendiendo la respuesta a estas preguntas, podemos entender los riesgos y diseñar mejores acciones para la prevención y control [4].

La importancia de diseñar un análisis de modo y efecto de fallas (AMEF) para empacadoras de Lima Persa radica en el potencial que tiene este sector agrícola, ya que México es uno de los líderes exportadores de este producto, el cual ha aumentado considerablemente en los últimos años, siendo Estados Unidos de Norteamérica el principal receptor del producto seguido por Europa y Japón. La citricultura es una actividad económica relevante ya que en materia de empleos genera 70 mil empleos directos, 250 mil indirectos y 28 millones de jornales cada año, y más de 67 mil familias de productores son beneficiadas con esta actividad [5].

Por lo que esta herramienta permite hacer un análisis del estado actual del proceso en la que debido a fallas y deficiencias se afecte el funcionamiento de la operación y por ende la satisfacción del cliente, mismas que generan mayores gastos o pérdidas económicas cuantiosas.

El análisis de modo y efecto de fallas (AMEF) es una herramienta sistemática para evaluar los modos de falla y las causas asociadas con los procesos de di-

seño y manufactura de un nuevo producto. En ella se hace una lista de los modos de falla potenciales de cada componente o sub-ensamblaje y se le asigna a cada uno una calificación numérica para la frecuencia de ocurrencia, el aspecto crítico y la probabilidad de detección. Por último, estas tres cifras se multiplican.

Para obtener el número de prioridad de riesgo (NPR), que se utiliza para guiar el esfuerzo de diseño al problema más crítico. Los casos con los más altos valores de NPR deben ser considerados primero a fin de recomendar acciones específicas con la intención de reducir la ocurrencia de las fallas [6].

Por lo que en conjunto con el diseño de esta técnica se proponen alternativas de acciones correctivas a ejecutar para la mejora del proceso, en las cuales se contemplan acciones básicas de supervisión y control por parte del encargado de cada área, así como opciones más avanzadas de sistemas de control automatizado mediante instrumentación virtual que permite obtener información en tiempo real y controlar las variables intrínsecas al proceso, además de que se prevé un impacto económico meramente exploratorio ya que con la automatización de ciertas áreas del proceso la inversión económica es mayor, pero el retorno de la inversión se reflejará paulatinamente, al no incurrir en indemnizaciones, aumento de la eficiencia de los procesos que por ende se reflejara en un aumento de la producción.

## MATERIAL Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en una línea de proceso de empaque de Lima Persa ubicada en el Municipio de Martínez de la Torre, Ver.

Las empacadoras citrícolas tienen como principales mercados de exportación a Estados Unidos de América, Europa y Japón, la cual este fruto fresco es transformado en subproductos en otras plantas de proceso, es el cítrico que ofrece más beneficios a la salud, pues ayuda a combatir naturalmente más de 200 enfermedades.

Su poder curativo, radica en el balance entre bajo contenido energético, nivel equilibrado de Sodio y Potasio y una gran aportación de Vitamina C. Otros usos, anticasca, blanqueador de manos, quita manchas de óxido, etc.

La metodología utilizada en este trabajo se muestra en el siguiente esquema la cual aparece en la basta bibliografía de ingeniería industrial, por citar [3]. Nótese que una buena definición de la intención del diseño juega un papel importante en este proceso para poder identificar los modos de falla y sus efectos, lo cual permite una toma de decisión en base a las recomendaciones resultantes.

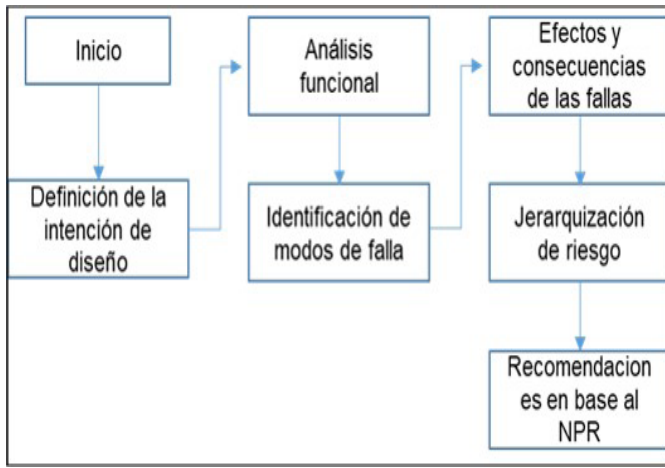


Figura 1. Diagrama de la metodología de análisis de modos de falla y sus efectos (AMEF).

## Definición de la intención de diseño

Para el análisis de modos de falla y sus efectos, AMFE (FMEA), la definición de la intención de diseño del sistema o equipo en análisis es altamente recomendable, ya que para poder entender como falla un activo, primero es necesario conocer cómo opera [7].

## Análisis funcional

El análisis funcional es necesario para poder entrar al proceso de evaluación de los modos de falla, ya que se requiere conocer e identificar cuáles son aquellas funciones que el usuario espera o desea que su activo desempeñe. Se requiere identificar tanto la función principal como las secundarias.

## Identificación de Modos de falla

Un modo de falla podemos definirlo como la forma en la que un activo pierde la capacidad de desempeñar su función o, en otras palabras, la forma en que un activo falla.

A cada modo de falla le corresponde una acción de mitigación o prevención, dentro del proceso de Administración del Riesgo estas acciones pueden ser orientadas a desviaciones del proceso, factores humanos, etc., o bien, como en este caso, donde el objetivo del AMEF es diseñar un plan de acciones recomendadas, a cada modo de falla le corresponderá una tarea.

## Efectos y consecuencias de la falla

Los efectos de la falla son considerados como la forma en la que la falla se manifiesta, es decir, como se ve perturbado el sistema ante la falla del equipo o activo, ya sea local o en otra parte del sistema, estas manifestaciones pueden ser: aumento / disminución de nivel, mayor / menor temperatura, activación de señales, alarmas o dispositivos de seguridad, entre

otras; similarmente, se considera también la sintomatología de la falla, ruido, aumento de vibración, etc.

## Jerarquización del riesgo

El proceso de jerarquización del riesgo de los diferentes modos de falla, resultante de la combinación de la frecuencia de ocurrencia por sus consecuencias, nos sirve para las acciones de recomendación, tanto en la etapa de evaluación como en la aplicación de los recursos económicos y humanos.

Tabla 1. Categorización de severidad. ([https://es.scribd.com/doc/111321077/AMEF-Tercera-edicion.](https://es.scribd.com/doc/111321077/AMEF-Tercera-edicion))

Ranking	Efecto	Criterio: Severidad de efecto definido
10	Peligroso: Sin aviso	Puede poner en peligro al operador, modo de fallas afecta la operación segura y/o involucra la no conformidad con regulaciones gubernamentales. La falla ocurrirá sin aviso.
9	Peligroso: con aviso	Puede poner en peligro al operador. Modo de fallas afecta la operación segura y/o involucra la no conformidad con regulaciones gubernamentales. La falla ocurrirá con aviso.
8	Muy alto	Interrupción mayor a la línea de producción. 100 % del producto probablemente sea desechado. Ítem inoperable, pérdida de su función primaria. Cliente muy insatisfecho.
7	Alto	Interrupción menor a la línea de producción. Producto probablemente deba ser clasificado y una porción desechado. Ítem operable pero a un nivel reducido de rendimiento. Cliente insatisfecho.
6	Moderado	Interrupción menor a la línea de producción. Una porción probablemente deba ser desechada. Ítem operable, pero algunos ítems de comforts/ conveniencia inoperable. Clientes experimentan incomodidad.
5	Bajo	Interrupción menor a la línea de producción. 100 % del producto probablemente retrabajada. Peo algunos ítems de confort/ conveniencia operable a un nivel reducido de rendimiento. Cliente experimenta alguna insatisfacción .
4	Muy bajo	Interrupción menor a la línea de producción. El producto probablemente deba ser clasificado y una porción retrabajada. Defecto percibido por la mayoría de los clientes.
3	Pequeño	Interrupción menor a la línea de producción. Una porción del producto probablemente deba ser retrabajada en línea pero fuera d ela estación de trabajo. Defecto es percibido por el cliente promedio.
2	Muy pequeño	Interrupción menor a la línea de producción. Una porción del producto probablemente deba ser retrabajada en línea pero fuera de la estación de trabajo. Defecto es percibido solo por clientes expertos.
1	Ninguno	Ningún efecto.

Tabla 2. Categorización de ocurrencia. ([https://es.scribd.com/doc/111321077/AMEF-Tercera-edicion.](https://es.scribd.com/doc/111321077/AMEF-Tercera-edicion))

Ranking	Posibles fallas	Probabilidad de falla	Cpk
10	1 en 2	Muy Alto.	< 0.33
9	1 en 3	Falla es casi inevitable.	0.33
8	1 en 8	Alta: Generalmente asociada con procesos similares a proceso previos.	0.51
7	1 en 20	Fallado frecuentemente.	0.67
6	1 en 80	Moderada: Generalmente asociados con procesos similares a procesos previos.	0.83
5	1 en 400	Que han experimentado fallas.	1.00
4	1 en 2,000	Ocasionales, pero no es proporciones significativas.	1.17
3	1 en 15,000	Baja: fallas aisladas asociadas con procesos similares.	1.33
2	1 en 150,000	Muy baja: solo fallas aisladas con procesos caso idénticos.	1.5
1	1 en 1,500,000	Remota: Falla es improbable. Fallas nunca asociadas con procesos casi idénticos.	1.67

Tabla 3. Categorización de detección. ([https://es.scribd.com/doc/111321077/AMEF-Tercera-edicion.](https://es.scribd.com/doc/111321077/AMEF-Tercera-edicion))

Ranking	Detección	Criterios: Probabilidad que la existencia de un defecto será detectada por la prueba conducida antes de que el producto avance al siguiente paso o proceso subsecuente.
10	Casi imposible	Prueba detecta < 80% de fallas.
9	Muy remota	Prueba debe detectar 80% de fallas.
8	Remota	Prueba debe detectar 82.5% de fallas.
7	Muy bajo	Prueba debe detectar 85% de fallas.
6	Bajo	Prueba debe detectar 87.5% de fallas.
5	Moderado	Prueba debe detectar 90% de fallas.
4	Altamente moderado	Prueba debe detectar 92.5% de fallas.
3	moderado	Prueba debe detectar 95% de fallas.
2	Muy alto	Prueba debe detectar 97.5% de fallas.
1	Casi seguro	Prueba debe detectar 99.5% de fallas.

Los criterios para la ponderación de la categoría de frecuencia de severidad, de ocurrencia y detección de los modos de falla, son los mostrados en la Tabla 1, 2 y 3. Para estimar el grado de afectación, se debe de tomar en cuenta el efecto de la falla en el cliente.

**RESULTADOS**

La metodología propuesta fue aplicada a una Empacadora de Lima Persa, cuyo diagrama de flujo de proceso se muestra en la Figura 2. El proceso de Empaque de Lima Persa, está conformada por los siguientes sistemas:

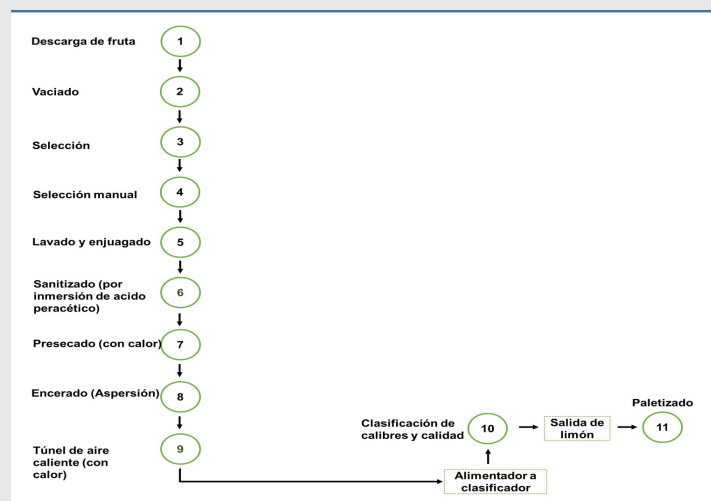


Figura 2. Diagrama de flujo de proceso de empaque de Lima Persa. Elaboración propia.

**Listado de operaciones del proceso**

1. La Lima Persa después de ser cosechada es trasladada en contenedores o camiones de las empacadoras, la cual ingresa de inmediato al área de recepción de fruta; donde se deja reposar aproximadamente 8 horas para disminuir la humedad de la fruta, posteriormente está listo para su proceso de tratamiento.

2. Área de vaciado; Se coloca el limón a la máquina para iniciar con su corrida.

3. Área de Torreón donde se descarta el limón que no cumple con la calidad de exportación debido a su diámetro.

4. Primera selección; se selecciona el limón manualmente teniendo 5 operadores, donde se descarta la fruta que no cumple con la calidad según el destino de exportación.

5. Lavado y enjuague; pre lavados para quitar los residuos de tierra, pesticidas o cualquier otro residuo adherido al limón.

6. Sanitizado; El limón entra a una tina de inmersión por aproximadamente 2 min, el cual la desinfección se realiza mediante la concentración de ácido peracético o cloro según el mercado de destino con 800 Lts de agua.

7. Presecado; el limón pasa por unos ventiladores para ser secado por aire a temperatura ambiente.

8. Encerado, la fruta es encerada, por medio de un dosificador automatizado.

9. Túnel de secado; la fruta pasa por el túnel para ser secada con aire caliente, mediante una llave de paso de gas.

10. Clasificación por calibres; la fruta se clasifica automáticamente por medio de un sizer para ser distribuida de acuerdo a su calibre (110, 150, 175, 200, 250), misma operación donde se pesan las cajas de 40 libras o se almacena limón para 10 libras.

11. Armado de pallets; se acomodan las cajas en pallets y ya están listas para ser enviadas a su destino.

A continuación, se describen las fases del proceso de empaque que se tomaron en cuenta para realización del Análisis de Modos y Efectos de Fallo, considerando que solo se incluyeron las áreas que presentan deficiencias en la operación.

- 1A. Vaciado de Limón
- 1B. Primera selección
- 1C. Enjabonado.
- 1D. Enjuague.
- 1E. Sanitizado.
- 1F. Túnel de secado.
- 1G. Sizer.
- 1H. Pesado.

**Análisis funcional**

Las funciones identificadas como resultado del análisis funcional para el proceso de empaque de Lima Persa son las que se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Análisis funcional. (Elaboración propia.)

N°	Funciones	N°	Falla funcional
1	Tiempo excesivo de vaciado.	1.1.1	Descontrol de tiempo del operador.
2	Se pasan limones segunda, tercera y con material vegetativo.	1.1.2	Los operadores no seleccionan adecuadamente el limón.
3	El jabón no se esparce de manera uniforme sobre la fruta.	1.1.3	Fuga de agua por un extremo de la jabolera.
4	El limón sale con residuos de jabón.	1.1.4	Los cepillos tienen exceso de jabón.
5	Se tapan los orificios de los aspersores.	1.1.5	Falta de presión del sistema.
6	El limón sale con residuos de jabón.	1.1.6	Se llena de hojas el desagüe.
7	Paros del proceso.	1.1.7	El diámetro de la llave estacionaria es pequeño.
8	Se ensucia muy rápido el agua.	1.1.8	La fruta llega con suciedad y material vegetativo.
9	No se seca totalmente la fruta.	1.1.9	Se presenta humedad existencial relativa.

### Identificación de modos de falla

Los modos de falla son identificados para cada falla funcional, pudiéndose tener el caso de que varios modos de falla originen la falla funcional. La etapa de los modos de falla, es la columna vertebral de la metodología de AMEF.

Tabla 5. Modos de falla. (Elaboración propia.)

Modos de falla			
Función general: Empaque de Lima Persa.	Modo potencial de falla	Observaciones causas potenciales/ mecanismos de la falla.	
1	1A	Tiempo excesivo de vaciado	Descontrol del tiempo del operador.
2	1B	Se pasan limones de segunda, tercera, y material vegetativo.	Los operadores no seleccionan adecuadamente el limón.
3	1C	El jabón no se esparce de manera uniforme sobre la fruta.	Fuga de agua por un extremo de la jabolera.
4	1D	El limón sale con residuos de jabón.	Los cepillos tienen exceso de jabón.
		Se tapan los orificios de los aspersores.	Falta de presión del sistema.
5	1E	El desagüe se tapa.	Se llena de hojas el desagüe.
		Paros del proceso.	El diámetro de la llave estacionaria es pequeño.
6	1F	Se ensucia muy rápido el agua.	La fruta llega con suciedad y material vegetativo.
		No se seca totalmente la fruta	Se presenta humedad existencial relativa.
7	1G	Se mezclan los calibres 110, 150, 230 con 250.	No se puede nivelar la temperatura de secado.
8	1H	Las cajas con fruta no pesan lo mismo.	Basculas descalibradas.

### Efecto de las fallas.

Tabla 6. Efectos de las fallas. (Elaboración propia.)

Modo de fallo	Efecto(s) potencial(es) de falla	Modo potencial de falla
1A	Espacios muertos entre los rodillos.	Tiempo excesivo de vaciado.
1B	Se afecta producto terminado.	Se pasan limones segunda, tercera y con materia vegetativo.
1C	La fruta queda con residuos de tierra	El jabón no se esparce de manera uniforme sobre la fruta.
1D	Se afecta la desinfección de la fruta.	El limón sale con residuos de jabón.
	Se tira el agua.	Se tapan los orificios de los aspersores.
1E	Tiempo excesivo de llenado	Paros del proceso.
	No se desinfecta la fruta.	Se ensucia muy rápido el agua.
1F	Se crean hongos en la fruta.	No se seca totalmente la fruta.
	La fruta se deshidrata.	
1G	La caja puede contener menos o mas kg del peso ideal.	Se mezclan los calibres 110 y 150, 230 con 250.
1H	Insatisfacción de clientes.	Las cajas con fruta no pesan lo mismo.

### Jerarquización del riesgo

La jerarquización del riesgo tiene como finalidad identificar aquellos modos de falla que tienen un mayor impacto en la satisfacción del cliente. La jerarquización, mencionada en la metodología, consiste en calificar la frecuencia de severidad, la ocurrencia y la detección con que se presentan las fallas, por sus consecuencias, en este caso, el valor mayor de la categoría de consecuencia, es el mandatorio basándose en el número de prioridad del riesgo. Los resultados de la calificación de frecuencia por consecuencia y su jerarquización se muestran en la Tabla 7.

Además, se definen las abreviaturas y la fórmula del cálculo del NPR.

Donde:

Sev = Severidad del riesgo

Occu = Probabilidad de ocurrencia

Detec = Probabilidad de detección

NPR = Numero de prioridad de riesgo (S × O × D).

Tabla 7. Jerarquización de riesgo. (Elaboración propia)

S e v	Causa(s) Mecanismos de la falla	Potencial(es) / O c c u	D e t e c	N P R	Acción (es) Recomendada (s)
1	Descontrol de tiempo del operador.	9	1	9	Contratar un operador mas. Implementar una banda de impulso para el vaciado de rejás.
8	Los operadores no seleccionan adecuadamente el limón.	6	7	336	Controlar la velocidad de los rodillos de acuerdo a la calidad proveniente del campo. Asignar dos operadores adicionales.
8	Fuga de agua por un extremo de la jabolera.	9	4	288	Realizar mantenimiento del dispensador de la jabolera. Implementar un sistema automatizado.
8	Los cepillos tienen exceso de jabón.	7	2	112	Dar Mantenimiento programado.
	Falta de presión del sistema.	8	1	64	Implementar un sistema de filtrado para los aspersores. Adaptar mas aspersores.
1	Se llena de hojas el desagüe.	7	2	14	Adaptar una malla a la bandeja en la filtración de agua. Retirar las hojas cada 300 rejás de Limón.
1	El diámetro de la llave estacionaria es pequeño.	8	5	40	Cambiar la llave por otra de mayor diámetro. Implementar un sistema de filtrado y recirculación del agua.
10	La fruta llega con suciedad y material vegetativo.	10	8	800	Aumentar la inspección (mas personal). Implementar un sistema de control de sanitizado.
8	Se presenta humedad existencial relativa.	9	6	432	Implementar un sistema de control de secado.
8	No se puede nivelar la temperatura de secado.	9	4	288	Implementar un sistema de calentamiento eléctrico. Implementar una fotocelda.
7	La forma del limón es diferente.	9	2	126	Realizar una inspección visual continuamente.
8	Basculas descalibradas.	8	7	336	Calibrar las basculas.

### DISCUSIÓN FINAL

Conforme a los resultados obtenidos, se identificaron modos de falla que requieren mayor atención dado su nivel de riesgo.

En las tablas mostradas 5 y 6 se pueden apreciar que la operación de enjuague, sanitizado y túnel de secado presentan más de un modo de falla potencial, donde se puede observar que existen fallos relacionados con el funcionamiento del proceso de la fruta y otros con el funcionamiento de la máquina, por lo que los efectos de fallo con mayor relevancia son los relacionados directamente con el proceso de la cadena de

valor de la fruta ya que impactan en la salud y bienestar del cliente, en la tabla 6 se puede observar que los efectos son; la ineficiencia en la desinfección ocasionados por falta de control en el área de Sanitizado, hongos y deshidratación de la fruta por ineficiencias en el túnel de secado.

En la tabla 7 se puede observar con color verde los modos de fallo que no repercuten en la calidad de la fruta como producto empacado, pero si afectan el tiempo de corrida del proceso e incluso afectan la seguridad de los trabajadores por lo que se incurre en gastos excesivos, entre los que podríamos mencionar pago por horas extra y gastos médicos por algún accidente de trabajo.

Los de color amarillo pueden llegar a generar sin frecuencia insatisfacción de clientes, sin llegar a perjudicar económicamente si se atiende de inmediato la queja.

El color rojo representa las operaciones de alerta y se consideran puntos críticos de control ya que estos efectos de falla pueden llegar a dañar la salud de los clientes, por lo que en estas operaciones el control debe ser muy estricto y apegado a los lineamientos (SENASICA) Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, además de que en el área de Sanitizado específicamente se afecta al medio ambiente con la descarga de efluentes a la red municipal (SEMARNAT) Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Por lo que para estas últimas operaciones con número de prioridad de riesgo mayor y que son identificadas con el color rojo, se recomienda diseñar sistemas de control automatizados basados en instrumentación virtual para asegurar el control de las variables involucradas en su valor deseado y que se pueda monitorear en tiempo real, con estas acciones se pueden evitar indemnizaciones, mala reputación de la empresa, reclamos y rechazos de la fruta por parte de los clientes.

## CONCLUSIONES

- La metodología de Análisis de Modos y Efectos de Fallos (AMEF), es una herramienta que evita el cuello de botella en el proceso de planeación de acciones correctivas en cada una de las áreas, por lo que se debe entender claramente y aplicar por personal con suficiente experiencia.

- AMEF, es una metodología simple, que de forma clara y concisa nos permite entender la forma en la que opera un sistema, pero sobre todo la forma en la que falla.

- Se identifican las mejores oportunidades para la aplicación de mejoras en los procesos.

- Aunque existen versiones abreviadas del AMEF, éste debe ser particular y específico para cada instalación o fases del proceso.

- En el proceso de análisis deben participar expertos en todas las disciplinas involucradas, personal con conocimientos de las disciplinas de análisis de riesgo, procesos de producción, inocuidad, mantenimiento entre otras.

- Las acciones recomendadas que se pueden aplicar por parte de la Empresa Citrícola pueden ser implementando mantenimiento preventivo y correctivo, acciones de supervisión incurriendo en una mínima inversión, por otra parte, también se pueden implementar sistemas automatizados que benefician en gran medida debido a su exactitud en la operación y que no requiere aumento de personal o una mayor inspección a lo que la inversión será mayor.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Todt O. *Entre demanda social y regulación: la seguridad alimentaria. Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad.* 2012;10(4):183-95.

[2] Maldonado, Ronald. *Herramientas estadísticas de la calidad para la diagnosis: estudio de un caso en la industria de productos cárnicos.* Octubre, 2007. Caracas, Venezuela.

[3] Miliotis M. *Role of microbial risk assessment in food safety.* S Afr Med J. 2007;97(11):1211-4.

[4] Aguilar-Otero, José R. *Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad.* 2010. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos A.C Monterrey, México.

[5] Rodríguez Cynthia, Mendoza Alberto (2014) *Una amenaza para la citricultura mexicana. La ciencia y el hombre. Revista de divulgación científica y tecnológica de la Universidad Veracruzana, Vol. XX-VII, núm. 1. Enero-abril 2014, México*

[6] Soin S (1997) *Control de Calidad Total. Claves, Metodologías Administración para el Éxito.* McGraw-Hill. Caracas, Venezuela. 305 pp.

[7] Cartin- Rojas A, Villarreal Tello A, Morera A. *Implementación del análisis de riesgo en la industria alimentaria mediante la metodología AMEF: enfoque práctico y conceptual.* Rev Med Vet. 2014;(27):133-148.

[8] *Análisis de Modos y Efectos de Fallas Potenciales (AMEFs) Primera Edición Publicada en Febrero, 1993* <https://es.scribd.com/doc/111321077/AMEF-Tercera-edicion>.

# Vehículos impulsados con residuos: un análisis del gas natural renovable como estrategia climática en México



## Colaboración

Edgar Roberto Sandoval García, Tecnológico de Estudios Superiores de Cuautitlán Izcalli

**RESUMEN:** Ante la problemática global del cambio climático, México propuso impulsar el uso del gas natural como una de las principales medidas para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Dado el escenario actual de destinar las reservas nacionales de gas natural convencional y las importaciones incrementales de gas de lutita a los sectores clave del país - generación de electricidad e industria - resulta poco probable que se cumpla la estrategia de incrementar el consumo de gas natural como principal medida de mitigación para uno de los sectores más demandantes de energía y emisor de GEI, el sector transporte. Una opción para explorar de manera holística es el potencial del gas natural renovable (GNR) procedente de la co-digestión de residuos orgánicos. Con el objetivo de tener claridad sobre el potencial del GNR en México y su capacidad de utilizarse al igual que el gas natural convencional como una vía estratégica de mitigación, en esta propuesta se estima el potencial teórico y el económicamente viable de GNR procedente de los principales residuos orgánicos generados en el país, encontrándose que es posible alcanzar las metas sugeridas de reducción de emisiones al 2030 en el sector transporte.

**PALABRAS CLAVE:** gas natural renovable, estrategia, cambio climático, sector transporte.

**ABSTRACT:** In the face of the global problem of climate change, Mexico proposed to promote the use of natural gas as one of the main measures to reduce its emissions of greenhouse gases (GHG). Given the current scenario of allocating national reserves of conventional natural gas and the incremental imports of shale gas to key sectors of the country - electricity generation and industry - it is unlikely that the strategy of increasing the consumption of natural gas as the main mitigation measure for one of the most demanding sectors of energy and emitter of GHG, the transport sector. One option to explore holistically is the potential of renewable natural gas (RNG) from the co-digestion of organic waste. In order to be clear about the potential of the RNG in Mexico and its capacity to be used as well as conventional natural gas as a strategic mitigation path, this proposal estimates the theoretical and the economically viable potential of RNG generated from the main organic waste produced in the country, finding that it is possible to achieve the suggested goals of reducing emissions in the transport sector by 2030.

**KEYWORDS:** renewable natural gas, strategy, climate change, transport sector.

## INTRODUCCIÓN

Derivado de los esfuerzos internacionales para hacer frente a la problemática de cambio climático global, México asumió en 2015 el compromiso, no condicionado, de reducir sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en 22 % al año 2030. Dicho compromiso quedó evidenciado al postularse las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (iNDC's, por sus siglas en inglés) acorde a la Convención Marco de las Nacio-

nes Unidas sobre el Cambio Climático, en donde el impulso al uso del gas natural (GN) se presentó como acción preponderante al estar presente en todas las medidas de mitigación de los sectores más contaminantes: sustitución de combustibles pesados por gas natural en la industria nacional, incrementar la flota vehicular a gas natural, recuperación y uso de metano en rellenos sanitarios municipales, plantas de tratamiento de aguas residuales y biodigestores en granjas agropecuarias [1].

Cabe mencionar que en específico para el sector transporte, a pesar de que México se ha planteado reducir en un 21%, de manera no condicionada, los compuestos de GEI al 2030 respecto a la línea base de 2013, al pasar de 229 a 181 Mt CO<sub>2</sub>e, el uso de gas natural como combustible limpio no resulta preponderante en los estudios prospectivos presentados por la Secretaría de Energía [2] al corto y mediano plazo tal como se muestra en la figura siguiente.

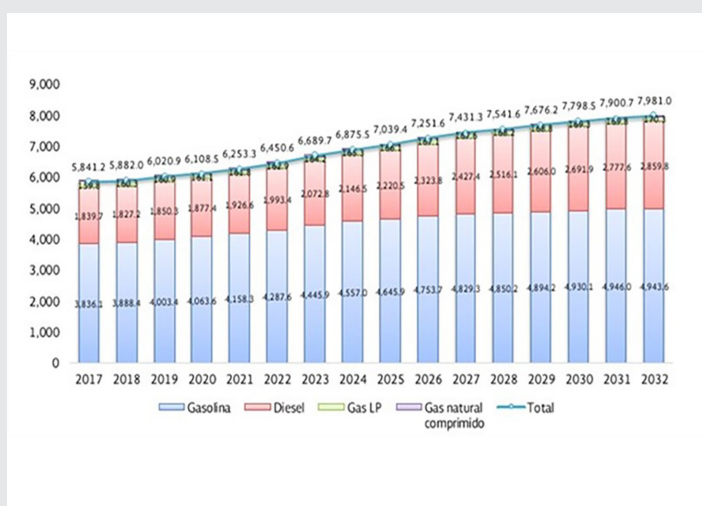


Figura 1. Demanda de combustibles fósiles para el sector auto-transporte 2017-2032, SENER (2018)

Es importante aclarar que ya hoy en día el GN es uno de los combustibles de mayor consumo en el país, ya que de los 7 611.9 millones de pies cúbicos diarios de gas natural (mmpcd) requeridos durante el 2017, el 50.8 % fue demandado por el sector eléctrico, seguido por la industria del petróleo con 26.4 % y sólo el 0.1 % fue consumido por el sector autotransporte [3]. Además de que las reservas de gas natural convencional (GNC), 3p (probadas, probables y posibles) al 1º de enero de 2017 fueron del orden de los 28 950 miles de millones de pies cúbicos, que, de ser consumidos al ritmo antes mencionado, representa sólo una reserva disponible para los próximos 10.4 años [4].

Así mismo, al cierre de 2017, México registró un volumen de importación de 4 073.3 mmpcd de gas natural por ducto, representando el 53.5 % del consumo nacional diario, lo que representó un incremento de 17.5 % respecto al 2016 [5]. Respecto a las importaciones

de gas natural licuado (GNL), éstas tuvieron una participación de 13.6 %, alcanzando un volumen de 638.6 mmpcd [6].

Lo anterior representa una tendencia nacional a la dependencia de combustibles fósiles de importación, especialmente de gas de lutitas (shale gas). De hecho, las exportaciones de GN de Estados Unidos de América (EUA) a México se han quintuplicado desde 2010. Dicho aumento repentino en las exportaciones de gas ha ocasionado el incremento en la fracturación hidráulica en los EUA, la expansión de gasoductos transfronterizos, y la supresión de las fuentes renovables de energía en México. La mitad de la electricidad de México ya proviene del GN y sólo el 1 % de la energía solar y eólica [7].

Ante el actual escenario de destinar el gas natural convencional nacional remanente y las crecientes importaciones de gas de lutita de EUA a sectores clave del país - generación de electricidad e industria - resulta poco probable que se cumpla la estrategia de incrementar el consumo de GN como principal medida de mitigación para el sector transporte. Ante esto resulta prioritario explorar otras fuentes de dicho combustible y más aún que por su origen pueda clasificarse como una fuente de energía renovable.

Así, la opción que tendría que convertirse en un tema estratégico para la seguridad energética del país es el Gas Natural Renovable (GNR), el cual es el biogás que se ha procesado a biometano con una pureza aproximada del 98 % y que se puede mezclar indistintamente con el gas natural convencional en todos sus usos finales.

Por lo anterior como premisa y derivado de la necesidad de tener claridad sobre el potencial del GNR en México y su capacidad de utilizarse al igual que el GNC como una vía estratégica de mitigación de gases de efecto invernadero, en específico para el sector que más emisiones genera en el país, el sector transporte, esta propuesta explica, de manera sucinta, por qué considerar al biometano como una fuente de energía renovable y su principal barrera para su adopción. Posteriormente se estima un potencial teórico de generación de biometano basado en datos de conversión de la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), aplicados a los principales residuos orgánicos que genera el país y se contrasta con un potencial denominado en este estudio económicamente viable, estimado en base a la capacidad de producción de plantas de generación que tienen más de una década de estar operando en Europa y que utilizan residuos orgánicos similares a los que se generan en el país. Finalmente se estima la cantidad de GNR necesaria para sustituir a combustibles fósiles, la cual permitiría cumplir con las metas de reducción de GEI planteadas al 2030 del sector transporte.



Cabe mencionar que, en México, desde el año 2007, se ha ocupado el biogás para la generación de energía eléctrica, pasando de una capacidad de generación de 19 MW a 169 MW en 2017. Así mismo al final del mismo año, existían 79 plantas de generación eléctrica basadas en bagazo de caña y biogás [8].

## El biometano, por su origen, una fuente renovable de energía.

La producción del biogás involucra la descomposición de materia orgánica mediante el proceso de digestión anaeróbica. El biogás resultante básicamente está compuesto entre 55 % a 70 % de metano (CH<sub>4</sub>) y 30 % a 45 % de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y trazas de otros gases. La materia prima típica incluye al estiércol, agua doméstica residual, residuos agrícolas y residuos domésticos orgánicos. A su vez, el biogás puede purificarse a biometano y usarse directamente en el sector transporte (Figura 2) o quemarse para generar calor y electricidad [9].

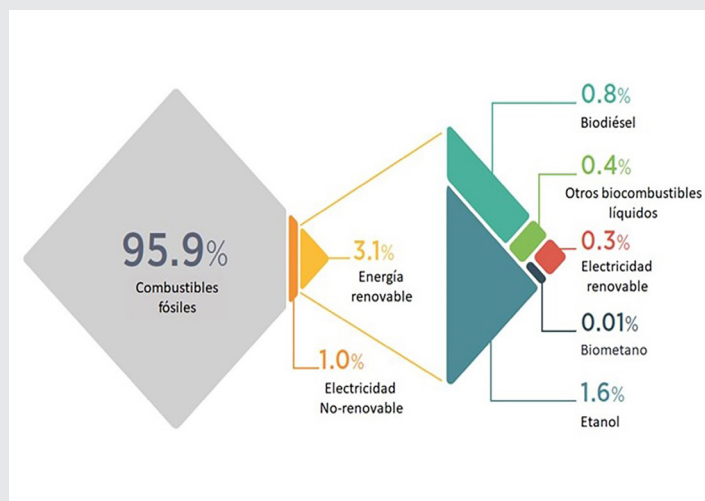


Figura 2. Participación de tipos de combustibles en el sector transporte a nivel mundial en 2015, IEA (2017)

En la actualidad, la investigación de Hofmann y Findeisen [10] confirma que, debido al tema de economía de escala, las plantas de biometano sólo son económicamente viables para altos niveles de volumen (entre 100 m<sup>3</sup>/h y 500 m<sup>3</sup>/h). No obstante, la posibilidad de inyectar biometano en la red de gas natural hace del biogás una fuente flexible de energía renovable, debido a la capacidad de utilizar a la red de gas como un sistema propio de almacenamiento, lo que puede ayudar a la estabilización de la red y usarse como combustible para transporte.

Por otra parte, además de la importancia de usar el biometano como un combustible renovable, su uso implicaría un gran aporte a mitigar el cambio climático a nivel mundial, ya que mientras que el CO<sub>2</sub> persiste en la atmósfera durante siglos, o incluso milenios, el CH<sub>4</sub> calienta el planeta súbitamente durante una década o dos antes de descomponerse en CO<sub>2</sub>. Durante

esas cortas décadas, el metano calienta el planeta 86 veces más que el CO<sub>2</sub>, acorde al Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático [11].

## Costo del GNR, principal reto para un uso masivo del biometano.

Si bien en la actualidad el costo internacional del GNR es del orden de 5 a 6 veces superior al del GNC (Figura 3), las ganancias derivadas de la eficiencia energética y la disminución de externalidades negativas como la contaminación en sus diversas vertientes, demuestran la viabilidad de inversión no solamente del sector privado sino también del público por los beneficios sociales que esta transición tecnológica traería para la sociedad en su conjunto [12].

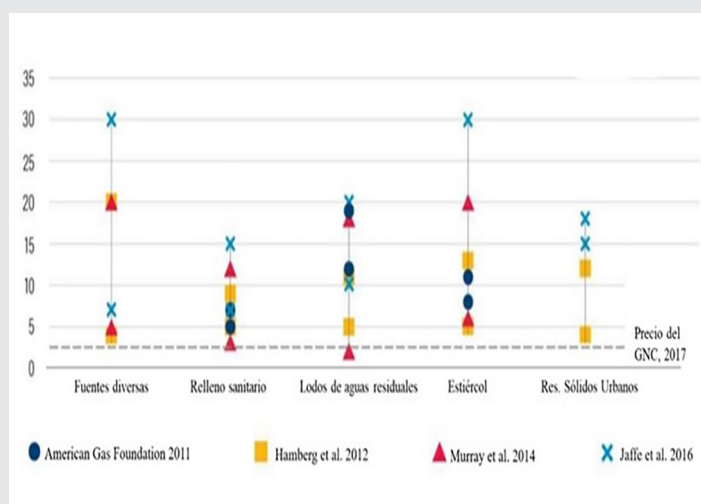


Figura 3. Precio del GNC Vs GNR de diversos orígenes, WRI (2018)

Por ejemplo, el costo social del metano estimado en los EUA bajo la administración del presidente Obama se fijó en un precio de alrededor de \$1 400 dólares por tonelada métrica a 2020. Dicho valor es 28 veces mayor al costo social del dióxido de carbono estimado durante la misma administración, que fue alrededor de \$50 dólares por tonelada métrica [13].

Durante septiembre del 2017, en México, el costo del gas natural alcanzó los 4.09 dólares por millón de unidades térmicas británicas (MMBTU) [14]. Respecto al precio del gas natural licuado, el precio estimado en México a mayo del 2017 fue de 5.28 dólares por MMBTU.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Dadas las metas de reducción de emisiones de GEI que diferentes naciones se han planteado, cada estrategia trazada cobra vital importancia para el cumplimiento de los objetivos. En el caso de México, dada la creciente dependencia energética y su papel como una de las naciones que más aporta a la emisión de GEI [15], es importante evaluar, de manera holística, los recursos disponibles y definir planes de acción para su máximo aprovechamiento. Es así como en esta

sección se evalúan las principales fuentes de residuos orgánicos y su potencial capacidad de generación de biometano (ver tabla 1) en base a valores de conversión validados [16].

**Tabla 1. Generación de biometano procedente de diversos tipos de material orgánico, The biogas Handbook, IEA Bioenergy (2013).**

Tipo de materia prima	MS (%)	SV % de MS	SV (%)	Rendimiento de biometano ( $m^3 CH_4 / kg SV$ )	Producción de biometano ( $m^3 CH_4 / m^3$ )
Purín de cerdo	5	80	4	0.3	12
Purín de ganado vacuno	8	80	6.4	0.2	12.8
Residuos de frutas	15-20	75		0.25 - 0.5	
Lodos de aguas residuales	5	75	3.75	0.4	15
Lodos de aguas residuales concentrados	10	75	7.5	0.4	30
Restos de comida	10	80		0.5-0.6	

## RESULTADOS

En esta sección se muestra el potencial de generación de biometano en base a su origen y se discute su impacto en la reducción de GEI en el sector transporte.

### Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Durante 2015 en México se generaron 53.1 millones de toneladas de basura al día, con un promedio per cápita de 1.2 kg/día. Lo cual representa un potencial energético desaprovechado ya que del total de los residuos generados en el país sólo se recicla el 9.6 %, mientras que en países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) el porcentaje varía entre 24 % a 58 % [17].

Sólo en la Ciudad de México (CDMX) se generan 12 893 toneladas/día de basura, posicionándola como una de las primeras cinco ciudades a nivel mundial con mayor generación de residuos sólidos urbanos (RSU), residuos que por lo general son enterrados en rellenos sanitarios del Estado de México, con un costo aproximado de 450 MXP por tonelada, entre gastos de flete, peaje y tarifa de los rellenos sanitarios [18].

A nivel país, los RSU generados presentan una composición típica de 53 % de materia orgánica, 28 %, de residuos potencialmente reciclables y 19 %, de no aprovechables [19].

Respecto a la cantidad de alimento que se desperdicia en el país, el Banco Mundial en su reporte Pérdidas y desperdicios de alimentos en México, estimó recientemente una cantidad de 20.4 millones de toneladas anuales, lo que representa en términos económicos alrededor de 491 mil millones de pesos al año y la generación de 36 millones de toneladas de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), un volumen similar a las emisiones generadas por 15.7 millones de vehículos anualmente [20].

Considerando sólo las 20.4 millones de toneladas anuales de alimentos desperdiciados, y acorde a la relación de sólidos volátiles (SV) mostrada en la tabla 1 y un rendimiento de  $0.55 m^3$  de  $CH_4/kg SV$ , es posible obtener 1.63 millones de toneladas de SV, con la capacidad de generar 897.6 millones de  $m^3/año$  de biometano.

### Lodos de aguas residuales.

Otra fuente potencial de emisiones de metano es el manejo y tratamiento de las aguas residuales municipales a través de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica. En la actualidad, la mayoría de los países desarrollados utilizan sistemas de tratamiento aeróbico centralizado para recolectar y tratar las aguas residuales municipales. Dichos sistemas producen pequeñas cantidades de metano, pero también grandes cantidades de biosólidos que podrían provocar altos índices de emisiones de metano. En los países en desarrollo donde la captura y tratamiento de aguas residuales es poca o inexistente, los sistemas tienden a ser anaeróbicos, y, por ende, provocan mayores emisiones de metano. Estos sistemas incluyen lagunas, sistemas sépticos y letrinas [21].

Acorde a SEMARNAT [22], durante 2015 las 2,477 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación en el país trataron sólo  $120.9 m^3/s$ , es decir el 57.0 % de los  $212.0 m^3/s$  recolectados a través de los sistemas de alcantarillado.

Tomando en cuenta la relación de SV procedentes de lodos de aguas residuales mostrada en la tabla 1, un rendimiento de  $0.4 m^3$  de  $CH_4/kg SV$  y sólo el 43 % del agua residual municipal que no recibe tratamiento en el país, es posible obtener hasta 116.5 millones de toneladas de sólidos volátiles, con lo cual se podrían generar hasta 46.7 millones de  $m^3$  anuales de biometano.

### Residuos Animales

Los residuos generados en granjas de producción animal (estiércol) son una excelente fuente de biometano. Cuando el estiércol se digiere anaeróticamente, se produce biogás, además de obtener como subproducto un fertilizante de gran calidad [23]. Sin embargo, los residuos de origen animal contienen un bajo contenido de material sólido, lo que provoca un bajo rendimiento por unidad de volumen de residuo digerido, en un rango de  $10 m^3$  a  $20 m^3$  de biometano por metro cúbico de recurso a digerir, además de los altos costos que implica el transporte de biomasa [24].

Aplicando la metodología propuesta por Vera-Romero, et al. [25] que calculan la cantidad de excretas producidas de forma anual en base al total de cabezas de ganado afectado por su tamaño y acorde a datos de la última encuesta agropecuaria realizada a nivel nacional [26], con las 28.4 millones de cabezas de ga-

nado bovino y los 14.15 millones de cerdos existentes en el país, se tendría la capacidad de producir hasta 110.6 millones de toneladas de excretas.

Considerando la relación de SV de purín de ganado vacuno y purín de cerdo mostrado en la tabla 1 con un rendimiento de 0.2 m<sup>3</sup> y 0.3 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/kg SV respectivamente y los datos mencionados en el párrafo anterior, es posible generar aproximadamente 1 409.6 millones de m<sup>3</sup> de biometano de forma anual.

Así al estimar el potencial de generación de biometano procedente sólo de los lodos de aguas residuales municipales, los residuos de alimentos y los residuos de animales de granja generados de forma anual (ver resumen en tabla 2), en México se tendría la capacidad de generar hasta 48 890 millones de m<sup>3</sup>/año, lo que representaría poder suministrar el 62.1 % del GN requerido en el país durante el 2017.

**Tabla 2. SV generados por tipo de residuo y su capacidad de generación de biometano.**

Tipo de residuo	SV (Mt/año)	Rendimiento de biometano (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg SV)	Generación de biometano (Mm <sup>3</sup> /año)
Lodos de agua residual	116.5	0.4	46 600
Desperdicios de comida	1.6	0.5-0.6	880
Estiércol bovino	6.6	0.2	1 320
Estiércol porcino	0.3	0.3	90

En este sentido, Thrän, et al. (2007, citado en [27]) estimó que a 2020 en Europa se podrían producir hasta 250 mil millones de metros cúbicos estándar (Nm<sup>3</sup>) de biometano procedentes de la biodigestión, los cuales podrían cubrir el 50 % de su demanda de gas natural.

No obstante, el análisis anterior propuesto en donde se estima teóricamente la capacidad de generación de biometano de manera individual por tipo de residuo (mono-digestión), la realidad que ocurre en diversos países en donde se ha explotado ampliamente la biomasa [28], es que se obtienen mejores condiciones de viabilidad económica a partir de la co-digestión de diferentes mezclas de residuos orgánicos, tales como: estiércol + residuos de alimentos o lodos de aguas residuales + restos de alimentos + diversos residuos orgánicos.

De hecho, la co-digestión de residuos animales y residuos industriales potencializan la producción de biometano, tal como el uso de diversos tipos de residuos orgánicos (aceite de pescado, de soya, margarinas, alcohol), los cuales pueden inducir rendimientos en el rango de 30 m<sup>3</sup> a 500 m<sup>3</sup> de biometano por metro cúbico de mezcla de residuos orgánicos [29]. Además de que en México se cuenta con condiciones óptimas de temperatura promedio, 19 – 21°C, a lo largo del año, las cuales han demostrado máximos valores de conversión a CH<sub>4</sub> [30], y en donde los subproductos generados, posterior a la digestión, pueden ser utilizados

como un excelente fertilizante rico en nutrientes y con bajo nivel de patógenos [31].

Con la finalidad de obtener un dato de generación de biogás tomando el criterio de viabilidad económica, se propone realizar el ejercicio de replicar en el país dos casos de plantas de biometano que operan desde hace más de una década en Europa [32], basadas en co-digestión (Caso 1: estiércol de bovino 50 % + desperdicio de comida 50 %, Caso 2: lodos de agua residual 96 %+ desperdicio de comida 4 %), con una productividad real de biometano al 98 % de 225 y 700 Nm<sup>3</sup>/h respectivamente. Para lo cual se consideró como componente limitante los 20.4 millones de toneladas anuales de desperdicio de comida en México, con lo cual se estima la posibilidad de generar hasta 2.65 mil millones de Nm<sup>3</sup> de biometano al año en 680 plantas a ser instaladas en zonas estratégicas cercanas al origen de los desechos utilizados.

Es así como un futuro viable para la producción de biometano deberá plantearse ya no en términos de sistemas de mono-digestión sino en base a sistemas de digestión con cosustratos que permitan mejor rentabilidad durante el proceso de generación, permitiendo así la sostenibilidad económica de los proyectos.

### El impacto del GNR en las emisiones de carbono del sector transporte.

Durante el 2017, el 79.4 % de los petrolíferos consumidos en el país, 1 225.14 miles de barriles diarios (mbd), se destinaron a las necesidades del sector transporte, de los cuales 798.8 mbd fueron de gasolina consumidos por 33 489 miles de vehículos (intensidad energética anual= 8.7 barriles/vehículo) y 344 mbd de diésel consumidos en un 92.4 % por 824 miles de vehículos (intensidad energética anual= 140.8 barriles/vehículo). Respecto al GN en 2018 se estimó un consumo de 6.1 mmpcd [33].

Al 2030 se estima, en base a proyecciones de consumo realizadas por la Secretaría de Energía [34], que la demanda de gasolina sea de 1 039.5 mbd, de diésel 497 mbd y 7.2 mmpcd de GN.

Utilizando los factores de emisión para los diferentes combustibles fósiles estimados por el INEEC [35] se prevé que al 2030 la quema de combustibles fósiles provenientes del sector transporte, emitiría 242.05 megatoneladas de dióxido de carbono (Mt CO<sub>2</sub>), ver desglose en la tabla siguiente.

En esta sección, los cálculos sobre la capacidad de reducción de emisiones, por el tipo de información disponible, se realizarán en base a la cantidad de dióxido de carbono emitido (CO<sub>2</sub>) y no en términos de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e), pero dado que el CO<sub>2</sub> es el gas de efecto invernadero de mayor concentración [36], los resultados nos permitirán te-

ner una imagen clara del impacto del uso del GNR en el sector transporte.

**Tabla 3. Desglose de emisiones de CO<sub>2</sub> derivados de combustibles fósiles al 2030.**

Combustible	mbd	M litros/año	kg CO <sub>2</sub> /L comb.	Mt CO <sub>2</sub> /L comb.
Gasolina	1 039.5	60 322.5	2.596	156.6
Diésel	464.9	26 978.3	2.322	62.6
Gas LP	43.6	2 530.1	1.58	3.9
Turbosina	130.5	7 573.0	2.462	18.6
	mmpcd	m <sup>3</sup> /año	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> GN	Mt CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> GN
Gas Natural	7.2	74 416 672.8	2.27	0.17

En este sentido, dado que el sector transporte tendría que reducir al 2030 sus emisiones de carbono de 242.05 a 191.2 Mt CO<sub>2</sub> y bajo el enfoque de que el GNR substituyera al diésel como combustible, debido a que la intensidad energética anual por vehículo es de 16:1 del diésel respecto a la gasolina, además de tomar en consideración que por factores de equivalencia calorífica 1 barril de diésel = 163.88 m<sup>3</sup> de gas natural, se tendrían que sustituir 380.4 mbd de diésel, equivalentes a 22.75 mil millones de m<sup>3</sup> GNR/año, lo que representa 8.6 veces el potencial de GNR viable económicamente (acotado en este estudio al recurso limitante de residuos de comida) o el 47 % del potencial teórico, valores estimados en secciones anteriores.

## CONCLUSIONES

Ante un futuro incierto de independencia energética, el país debe explorar ampliamente los recursos renovables subutilizados, uno de ellos es el gas natural renovable o biometano, el cual es cada vez más visto como una alternativa confiable de energía a nivel mundial. Además de que, dado su gran potencial como gas de efecto invernadero, resulta más adecuado para el medio ambiente y la población el que se utilice mediante un proceso de combustión a permitir su interacción directa con la atmósfera, dejando a un lado el sobre costo actual de su producción, ya que las comparaciones no toman en cuenta factores como los diferentes subsidios aplicados a los combustibles fósiles durante su cadena de suministro.

Conforme a la propuesta holística de este estudio, se estima un gran potencial teórico de generación de biometano el cual podría cubrir más del 50% de la demanda de gas natural del país, dada la inmensa cantidad de residuos de diferente origen orgánico que se generan cada año, situación que debería ser ampliamente estudiada, para definir las mejores condiciones de viabilidad económica.

Una opción por seguir, y acorde a la experiencia de otros países que han explotado ya el recurso desde algunos años, son los procesos de co-digestión los que permitirían generar proyectos rentables e inclu-

sive tener mejores rendimientos de producción de biometano que los procesos de mono-digestión, por lo que se sugiere elaborar estudios detallados para definir la cadena óptima de suministro para la generación de biometano en base a los diferentes residuos orgánicos presentes en el país.

Adicional a lo anterior, el transitar a biometano como combustible vehicular, permitiría coadyuvar al cumplimiento de las metas de reducción de emisiones de GEI del sector transporte, dada la mejor eficiencia de combustión del metano respecto a la gasolina y el diésel, sin mencionar que se estaría consumiendo un combustible renovable con la capacidad de ser almacenado, a diferencia de otras fuentes renovables como el viento o la radiación solar, lo que garantizaría un suministro confiable de energía.

Además de que la transición de combustibles fósiles a combustibles de origen renovable provocaría condicionantes de crecimiento y empleo, competitividad, descarbonización del transporte y diversificación del portafolio energético. Sin embargo, tal como Campos y Pérez [37] señalan "para aumentar la eficiencia y reducir los costos del sistema, se requerirá no solamente de un espectro más amplio de tecnologías y combustibles, sino también de nuevas herramientas de planificación, marcos regulatorios de apoyo y un mayor diálogo político tanto nacional como con en el ámbito regional" (p. 7).

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] SEMARNAT (2015). *México rumbo a la COP-21. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de <http://www.depfe.unam.mx/actividades/15/Paris2015sem-SEMARNAT.pdf> 15/06/2018*
- [2] SENER (2018). *Prospectiva de petróleo crudo y petrolíferos 2018-2032. Secretaría de Energía. Recuperado de [http://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PPP\\_2018\\_2032\\_F.pdf](http://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PPP_2018_2032_F.pdf)*
- [3] *Ibidem*
- [4] SENER (2017). *Prospectiva de gas natural 2017-2031. Secretaría de Energía. Recuperado de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/302380/PGN\\_17\\_FF1.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/302380/PGN_17_FF1.pdf)*
- [5] *Ibidem*
- [6] SENER (2018). *Prospectiva de gas natural 2018-2032. Secretaría de Energía. Recuperado de [http://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PGN\\_18\\_32\\_F.pdf](http://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PGN_18_32_F.pdf)*
- [7] Ackerman, F., Álvarez A., Laxer. G., Beachy, B. (2018). *TLCAN 2.0: ¿A favor de las personas o*

de los contaminadores? Recuperado de <https://www.sierraclub.org/sites/www.sierraclub.org/files/uploads-wysiwig/TLCAN%202.0%202018.pdf>

[8] SENER (2018). *Prospectiva de energías renovables 2018-2032*. Secretaría de Energía. Recuperado de [http://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PER\\_18\\_32\\_F.pdf](http://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PER_18_32_F.pdf)

[9] WBA (2017). *WBA Global bioenergy statistics 2017*. World Bioenergy Association. Recuperado de [http://worldbioenergy.org/uploads/WBA%20GBS%202017\\_hq.pdf](http://worldbioenergy.org/uploads/WBA%20GBS%202017_hq.pdf)

[10] Hofmann, F. y Findeisen, C. (2017). *El uso de biometano en el sector del transporte - ¿una opción viable?* Sustainable Urban Transport Project. Recuperado de <https://sutp.org/es/news-reader/el-uso-de-biometano-en-el-sector-del-transporte-una-opcion-viable.html>

[11] Vaidyanathan, G. (2015). *How Bad of a Greenhouse Gas Is Methane?* Recuperado de <https://www.scientificamerican.com/article/how-bad-of-a-greenhouse-gas-is-methane/>

[12] Campos R. y Pérez, G. (2019). *Tecnología y recambio energético en el transporte automotor de América Latina y el Caribe*. Recuperado de [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44439/1/S1900028\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44439/1/S1900028_es.pdf)

[13] Heikkinen, N. (2017). *EPA Revises the Social Cost of a Potent Greenhouse Gas*. Recuperado de <https://www.scientificamerican.com/article/epa-revises-the-social-cost-of-a-potent-greenhouse-gas/>

[14] SENER (2017). *Prospectiva de gas natural 2017-2031*. Secretaría de Energía. Recuperado de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/302380/PGN\\_17\\_FF1.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/302380/PGN_17_FF1.pdf)

[15] WRI (2014). *6 Graphs Explain the World's Top 10 Emitters*. World Resources Institute. Recuperado de <https://www.wri.org/blog/2014/11/6-graphs-explain-world-s-top-10-emitters>. Fecha de consulta: 10 de noviembre de 2018.

[16] IEA-Bioenergy (2013). *The biogas handbook. Science, production and applications*. International Energy Agency-Bioenergy. Woodhead Publishing. Series in Energy: Number 52.

[17] Enciso, A. (2017, mayo 08). *Aumenta generación de basura; al día, cada mexicano tira 1.2 kilos*. La Jornada. Recuperado de <http://www.jornada.unam.mx>

[18] Durand, B. (2017, marzo 27). *Energía generada por basura moverá al metro*. El Universal. Recuperado de <http://www.eluniversal.com.mx>

[19] Carrasco, J. y Rodríguez, J. (2015). *Análisis de estadísticas del INEGI sobre residuos sólidos urbanos*. Recuperado de [http://www.inegi.org.mx/RDE/rde\\_14/doctos/rde\\_14\\_art2.pdf](http://www.inegi.org.mx/RDE/rde_14/doctos/rde_14_art2.pdf)

[20] SENER (2017). *Prospectiva de gas natural 2017-2031*. Secretaría de Energía. Recuperado de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/302380/PGN\\_17\\_FF1.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/302380/PGN_17_FF1.pdf)

[21] GMI (2013). *El metano de las aguas residuales municipales: Reducir emisiones, avanzar en la recuperación y aprovechar oportunidades*. Global Methane Initiative. Recuperado de [https://www.globalmethane.org/documents/ww\\_fs\\_spa.pdf](https://www.globalmethane.org/documents/ww_fs_spa.pdf)

[22] SEMARNAT (2016). *Estadísticas del Agua en México, edición 2016*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de [http://201.116.60.25/publicaciones/eam\\_2016.pdf](http://201.116.60.25/publicaciones/eam_2016.pdf)

[23] Mata, J. y Romero-Hernández, O. (2011). *Cap. 5 Bioenergía, parte I: biomasa y biogás*. En *Energías Renovables: Impulso político y tecnológico para un México Sustentable* (pp. 126-159). México: ITAM.

[24] IEA-Bioenergy (2013). *The biogas handbook. Science, production and applications*. International Energy Agency-Bioenergy. Woodhead Publishing. Series in Energy: Number 52.

[25] Vera-Romero, I., Estrada-Jaramillo, M., Martínez-Reyes, J., Ortiz-Soriano, A. (2014). *Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: excretas de ganado bovino y porcino*. Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XV (número 3), julio-septiembre 2014: 429-436.

[26] INEGI (2014). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Recuperado de <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/encagro/ena/2014/>

[27] IEA-Bioenergy (2013). *The biogas handbook. Science, production and applications*. International Energy Agency-Bioenergy. Woodhead Publishing. Series in Energy: Number 52.

[28] Urbanbiogas (2011). *Good practice projects for biogas production from waste, upgrading and utilization*. Recuperado de [http://www.urbanbiogas.eu/images/pdf/1stPR/ANNEX\\_1\\_9\\_D2\\_2\\_FRAUNHOFER\\_EN\\_GoodPrBiogas.pdf](http://www.urbanbiogas.eu/images/pdf/1stPR/ANNEX_1_9_D2_2_FRAUNHOFER_EN_GoodPrBiogas.pdf)

[29] IEA-Bioenergy (2013). *The biogas handbook. Science, production and applications. International Energy Agency-Bioenergy. Woodhead Publishing. Series in Energy: Number 52*

[30] Hambaliou, B., VanderZaag, A., Burt, S., Wagner-Riddle, C., Crolla, A., Desjardins, R. MacDonald, D. (2016). Methane emissions from digestate at an agricultural biogas plant. *Bioresource Technology* 216 (2016) 914-922.

[31] Pampillón-González L., Luna-Guido M., Ruíz-Valdiviezo V. M., Franco-Hernández O., Fernández-Luqueño F, Paredes-López O., Hernández G., Dendooven L. (2017). Greenhouse gas emissions and growth of wheat cultivated in soil amended with digestate from biogas production. *Pedosphere*. 27(2): 318-327.

[32] Urbanbiogas (2011). *Good practice projects for biogas production from waste, upgrading and utilization. Recuperado de [http://www.urbanbiogas.eu/images/pdf/1stPR/ANNEX\\_1\\_9\\_D2\\_2\\_FRAUNHOFER\\_EN\\_GoodPrBiogas.pdf](http://www.urbanbiogas.eu/images/pdf/1stPR/ANNEX_1_9_D2_2_FRAUNHOFER_EN_GoodPrBiogas.pdf)*

[33] SENER (2018). *Prospectiva de petróleo crudo y petrolíferos 2018-2032. Secretaría de Energía. Recuperado de [http://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PPP\\_2018\\_2032\\_F.pdf](http://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PPP_2018_2032_F.pdf)*

[34] Ibidem

[35] INECC (2014). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC\\_2014\\_FE\\_tipos\\_combustibles\\_fosiles.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf)*

[36] CCES (2019). *Main Greenhouse gases. Center for Climate and Energy Solution. Recuperado de <https://www.c2es.org/content/main-greenhouse-gases/>*

[37] Campos R. y Pérez, G. (2019). *Tecnología y recambio energético en el transporte automotor de América Latina y el Caribe. Recuperado de [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44439/1/S1900028\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44439/1/S1900028_es.pdf)*