

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY**



**ESCUELA DE GOBIERNO Y TRANSFORMACIÓN PÚBLICA**

**SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA POR BIOGÁS A CORTO PLAZO.  
UN CASO DE ESTUDIO DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES “DULCES NOMBRES” Y “NORTE” EN MONTERREY, N.L.**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO  
ACADEMICO DE:**

**MAESTRO EN PROSPECTIVA ESTRATÉGICA**

**POR:**

**JAVIER RIVERA BERUMEN**

**MONTERREY, N.L.**

**DICIEMBRE DE 2020**

## DEDICATORIA

A Dios, que me acompaña y siempre me da fuerza para levantarme de mi continuo tropiezo.

A mi madre, por tu amor y apoyo incondicional, porque sin ello no hubiera alcanzado esta meta. Tu bendición a diario a lo largo de mi vida me ha protegido y me ha llevado por el camino del bien. Por eso te doy mi trabajo como agradecimiento por tu paciencia y amor, te amo.

A mi padre, que a pesar de que la vida nos separó, me forjó como la persona que soy en la actualidad. Tu hambre de superación y deseo por nunca dejar de aprender me ha hecho llegar hasta donde me encuentro.

A mis hermanos, por brindarme su tiempo y un hombro para descansar, además de permitirme aprender más de la vida a su lado.

Esto es posible gracias a ustedes.

## AGRADECIMIENTOS

Al comité de tesis por todo su apoyo brindado en esta disertación: Dra. Guillermina Benavides Rincón, Dr. Alejandro Díaz Domínguez y Mtro. José Luis Bustos Villegas. Alejandro, gracias por el asesoramiento para llevar a cabo este proyecto de investigación, sin todo el apoyo brindado este objetivo hubiera sido más difícil de alcanzar. Guillermina, gracias por la retroalimentación brindada para el desarrollo de esta tesis, así como el apoyo brindado como directora del programa académico. José Luis, de igual manera, agradezco sus comentarios y observaciones los cuales fueron enriquecedores para lograr una mejor versión de este trabajo. Sólo basta decir que fue un honor haber realizado esta disertación bajo la tutela de grandes apasionados en la materia.

Agradezco a la Secretaría de Energía (SENER) por la beca académica otorgada a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y darme la oportunidad de estudiar la Maestría en Prospectiva Estratégica.

Así mismo, agradezco a la M.C. Karla Jovanka Aguilar Limón y a las autoridades del Servicio de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM), por la información facilitada para lograr llevar a cabo este proyecto de investigación, así como al personal involucrado directa o indirectamente.

Por otro lado, agradezco a la Escuela de Gobierno y Transformación Pública del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) y a sus colaboradores por brindarme todos los recursos necesarios para lograr esta meta. A mis profesores que por estos más de dos años y medio compartieron conmigo sus experiencias, sus conocimientos y herramientas necesarias para desarrollar con éxito esta tesis.

A mi familia y amistades por tenerme paciencia durante esta etapa académica y que además me brindaron su total apoyo y me motivaron para obtener este grado académico.

Por último y no menos importante a mis compañeros de generación por permitirme conocerlos tanto en lo personal como en lo profesional, por esos días de estudio, pero también por esos días de júbilo, porque gracias a ellos fue más sencilla esta etapa de formación académica.

*“En un mundo en el que la demanda de agua potable crece continuamente, y donde los limitados recursos hídricos se ven cada vez más estresados por la sobreextracción, la contaminación y el cambio climático, desaprovechar las oportunidades que surgen de una mejor gestión de las aguas residuales es impensable en el contexto de una economía circular.”*

Informe de la ONU sobre el desarrollo del agua en el mundo (WWAP 2017)

## RESUMEN

El cambio climático y la escasez del agua son dos de los mayores problemas que amenazan a la población a nivel mundial. Según la Organización Mundial de la Salud aproximadamente el 27% de la población mundial se abastece de una fuente de “agua potable” que está contaminada, la cual puede transmitir enfermedades que ponen en riesgo la salud de las personas; estimando que el agua contaminada provoca alrededor de 502 000 muertes por diarrea al año. Así mismo, se estima que para el año 2025 la mitad de la población mundial vivirá en zonas con escases de agua (OMS, 2019). De igual manera, la Organización Mundial de la Salud establece que en los últimos 50 años el consumo de combustibles fósiles ha contribuido a la liberación de una gran cantidad de gases de efecto invernadero que ha generado una alteración al clima mundial, estimando que entre el año 2030 y 2050 el cambio climático pudiera estar causando aproximadamente 250 000 defunciones anuales debido a problemas relacionados con el cambio climático (OMS, 2018). Es por esto que esta investigación aborda estos dos problemas para comenzar a generar cambios en los hábitos de consumo de los recursos naturales con el fin de se comiencen a mitigar estos problemas. En general, México cuenta con una amplia variedad de opciones para la generación de energías limpias, siendo el biogás uno de los combustibles ideales para la generar energía eléctrica ya que además de obtener energía limpia ayuda a evitar que este gas, que es un gas de efecto invernadero altamente nocivo, sea liberado al medio ambiente y perjudique al medio ambiente. Además de que es de suma importancia el tratar las aguas residuales antes de ser vertidas a cuerpos de aguas naturales y así evitar problemas a la salud.

Para realizar esta investigación se tomó como caso de estudio las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales “Dulces Nombres” y “Norte”, las cuales son las dos más importantes del estado de Nuevo León. Este proyecto de investigación está analizado a través de modelos de series de tiempo con pronósticos univariados, bivariados y multivariados, llegando a la conclusión, para este caso de estudio, que el mejor método de pronóstico es el de redes neuronales, obteniendo como resultado que las plantas de tratamiento pueden ser autosuficientes energéticamente y que pudieran estar generando una economía circular para Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey.

**Palabras clave:** arima, autorregresión vectorial en R, biogás, energía eléctrica, energía limpia, ets, forecasting, redes neuronales, tratamiento de agua

## CONTENIDO

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| DEDICATORIA .....                                       | 3  |
| AGRADECIMIENTOS.....                                    | 4  |
| RESUMEN .....                                           | 6  |
| LISTA DE FIGURAS.....                                   | 9  |
| LISTA DE TABLAS.....                                    | 11 |
| CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....                           | 12 |
| JUSTIFICACIÓN .....                                     | 14 |
| OBJETIVO Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN .....             | 15 |
| Objetivo general.....                                   | 15 |
| Objetivos específicos.....                              | 15 |
| PALNTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                        | 16 |
| HIPÓTESIS.....                                          | 16 |
| APORTACIÓN .....                                        | 17 |
| CAPÍTULO II: MARCO CONTEXTUAL .....                     | 18 |
| ENERGÍAS LIMPIAS .....                                  | 20 |
| IMPORTANCIA DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....    | 20 |
| SITUACIÓN DEL BIOGÁS .....                              | 23 |
| INTERNACIONAL.....                                      | 23 |
| NACIONAL.....                                           | 25 |
| USOS Y BENEFICIOS .....                                 | 26 |
| USOS.....                                               | 28 |
| BENEFICIOS.....                                         | 29 |
| MARCO REGULATORIO EN ENERGÍAS RENOVABLES.....           | 31 |
| BARRERAS PARA EL DESARROLLO DE LOS BIOCOMBUSTIBLES..... | 35 |
| ESTIMACIÓN DE AHORRO EN ENERGÍA ELÉCTRICA .....         | 36 |
| CAPÍTULO III: MARCO METOLOGÓGICO .....                  | 38 |
| SERIES DE TIEMPO Y ESTUDIOS DE FUTURO .....             | 38 |
| METODOLOGÍA.....                                        | 39 |
| VARIABLES .....                                         | 40 |
| POBLACIÓN.....                                          | 41 |
| TEMPERATURA ATMOSFÉRICA.....                            | 42 |

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| GASTO DE AGUAS RESIDUALES .....                                    | 42 |
| ENERGÍA ELÉCTRICA .....                                            | 42 |
| BIOGÁS .....                                                       | 43 |
| CAPÍTULO IV: APLICACIÓN METODOLÓGICA Y PROCESAMIENTO DE DATOS..... | 44 |
| DESCOMPOSICIÓN X11 .....                                           | 44 |
| MODELO ETS (ERROR, TENDENCIA, ESTACIONAL) .....                    | 44 |
| MMODELO ARIMA .....                                                | 45 |
| MÉTODO DE AUTORREGRESIÓN VECTORIAL EN R.....                       | 45 |
| MÉTODO DE REDES NEURONALES .....                                   | 46 |
| AUTORREGRESIÓN DE LA RED NEURONAL. ....                            | 47 |
| CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y RESULTADOS.....                             | 48 |
| DESCOMPOSICIÓN X11 .....                                           | 49 |
| MÉTODO ETS (ERROR, TENDENCIA, ESTACIONAL).....                     | 51 |
| MÉTODO AUTO.ARIMA .....                                            | 53 |
| AUTORREGRESIÓN DE LAS REDES NEURONALES .....                       | 55 |
| MODELOS DINÁMICOS.....                                             | 57 |
| MÉTODO DE AUTORREGRESIÓN VECTORIAL EN R.....                       | 60 |
| PLANTA “DULCES NOMBRES” .....                                      | 60 |
| PLANTA “NORTE” .....                                               | 62 |
| CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES.....                                     | 68 |
| SÍNTESIS Y RESPUESTA A LAS PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....         | 68 |
| APRENDIZAJES Y HALLAZGOS EN EL PROCESO DE INVESTIGACIÓN.....       | 70 |
| LIMITACIONES Y SUGERENCIAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES. ....      | 71 |
| BIBLIOGRAFÍA.....                                                  | 72 |
| ANEXOS .....                                                       | 77 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1. SEIS TENDENCIAS MUNDIALES RELEVANTES PARA AMÉRICA LATINA.....                                                                         | 20 |
| FIGURA 2. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE .....                                                                                              | 22 |
| FIGURA 3. COSTO NIVELADO DE ENERGÍA PARA PRODUCIR ENERGÍA ELÉCTRICA POR BIOMASA DE LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS COMERCIALES.....                 | 25 |
| FIGURA 4. METAS PARA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A TRAVÉS DE ENERGÍAS LIMPIAS.....                                                               | 25 |
| FIGURA 5. FUENTES POTENCIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS PROVENIENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....                      | 26 |
| FIGURA 6. USOS DEL BIOGÁS .....                                                                                                                 | 29 |
| FIGURA 7. FLUJOS POTENCIALES DE INGRESOS Y AHORROS DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO PARA LA RECUPERACIÓN DE LOS RECURSOS.....                      | 30 |
| FIGURA 8. ARTÍCULOS DE LA CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS DE ENERGÍAS RENOVABLES..... | 32 |
| FIGURA 9. PRINCIPALES LEYES PARA LA PLANEACIÓN ENERGÉTICA Y SU REGULACIÓN.....                                                                  | 32 |
| FIGURA 10. OBJETIVOS DE LAS LEYES QUE PROMUEVEN UN MAYOR USO DE ENERGÍAS RENOVABLES .....                                                       | 33 |
| FIGURA 11. PRINCIPALES BARRERAS PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA EN MÉXICO .....                                      | 36 |
| FIGURA 12. RELACIÓN DEL FORECASTING Y LA PROSPECTIVA CON LA INFORMACIÓN Y LA INCERTIDUMBRE .....                                                | 39 |
| FIGURA 13. CRECIMIENTO POBLACIONAL EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY.....                                                                   | 42 |
| FIGURA 14. RED NEURONAL LINEAL .....                                                                                                            | 46 |
| FIGURA 15. RED NEURONAL NO LINEAL .....                                                                                                         | 47 |
| FIGURA 16. SERIES DE CADA VARIABLE DE ESTUDIO PARA LA PLANTA “DULCES NOMBRES” .....                                                             | 48 |
| FIGURA 17. SERIES DE CADA VARIABLE DE ESTUDIO PARA LA PLANTA “NORTE” .....                                                                      | 49 |
| FIGURA 18. DESCOMPOSICIÓN X11 DE LOS DATOS DE LA PLANTA “DULCES NOMBRES” .....                                                                  | 50 |
| FIGURA 19. DESCOMPOSICIÓN X11 DE LOS DATOS DE LA PLANTA “NORTE” .....                                                                           | 50 |
| FIGURA 20. MÉTODO DE PRONÓSTICO ETS PARA PLANTA “DULCES NOMBRES” .....                                                                          | 52 |
| FIGURA 21. MÉTODO DE PRONÓSTICO ETS PARA PLANTA “NORTE” .....                                                                                   | 53 |
| FIGURA 22. MÉTODO DE PRONÓSTICO ARIMA PARA PLANTA “DULCES NOMBRES” .....                                                                        | 54 |
| FIGURA 23. MÉTODO DE PRONÓSTICO ARIMA PARA PLANTA “NORTE” .....                                                                                 | 55 |
| FIGURA 24. MÉTODO DE PRONÓSTICO AUTORREGRESIÓN DE LA RED NEURONAL PARA PLANTA “DULCES NOMBRES” .....                                            | 56 |



|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 25. MÉTODO DE PRONÓSTICO AUTORREGRESIÓN DE LA RED NEURONAL PARA PLANTA “NORTE” .....        | 57 |
| FIGURA 26. MODELOS DINÁMICOS PARA PLANTA “DULCES NOMBRES” .....                                    | 58 |
| FIGURA 27. MODELOS DINÁMICOS PARA PLANTA “NORTE” .....                                             | 60 |
| FIGURA 28. FORECAST VAR PARA BIOGÁS.....                                                           | 62 |
| FIGURA 29. FORECAST VAR PARA BIOGÁS.....                                                           | 63 |
| FIGURA 30. CANTIDAD DE ENERGÍA ELECTRICA GENERADA VS PRONÓSTICO PARA PLANTA “DULCES NOMBRES” ..... | 66 |
| FIGURA 31. CANTIDAD DE ENERGÍA ELECTRICA DEMANDADA VS PRONÓSTICO PARA PLANTA “NORTE” .....         | 67 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABLA 1 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR BIOMASA Y PARTICIPACIÓN DEL BIOGÁS. ....                                       | 30 |
| TABLA 2. PTAR EN MÉXICO CON CAPACIDAD POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.<br>.....                               | 37 |
| TABLA 3. REDUCCIÓN DE EMISIONES DE LAS PTARS POR NO UTILIZAR LA RED CONVENCIONAL DE<br>ENERGÍA ELÉCTRICA. IMTA (2016)..... | 37 |
| TABLA 4. VENTAJAS DE LOS MÉTODOS CUANTITATIVOS.....                                                                        | 39 |
| TABLA 5. INFORMACIÓN DE VARIABLES DE ESTUDIO.....                                                                          | 43 |
| TABLA 6. MEDIDAS DE PRESICIÓN CALCULADAS PARA LA PLANTA “DULCES NOMBRES” .....                                             | 64 |
| TABLA 7. MEDIDAS DE PRESICIÓN CALCULADAS PARA LA PLANTA “NORTE” .....                                                      | 65 |
| TABLA 8. VALORES PRONÓSTICO PARA VARIABLES DE ESTUDIO .....                                                                | 65 |
| TABLA 9. REDUCCIÓN DE TONELADAS DE DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE .....                                                    | 67 |

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El tema sobre el que se desarrollará la investigación es la sostenibilidad energética mediante el aprovechamiento del biogás generado en las dos plantas de tratamiento de agua más importantes con las que cuenta el Estado de Nuevo León operadas por la empresa Agua y Drenaje de Monterrey, para la generación de energía eléctrica y su autoconsumo en los procesos propios de cada una de las plantas.

La sostenibilidad energética está relacionada con la generación y uso eficiente de las energías renovables, tema que actualmente tiene una importancia alta ya que se busca dejar de utilizar combustibles fósiles y reemplazarlos por energías alternativas que sean más sustentables y no perjudiquen el medio ambiente; ya que como menciona Makisha (2018), el aumento en la demanda de la energía eléctrica y la limitación de las emisiones de dióxido de carbono son los dos problemas globales que requieren una solución urgente.

El crecimiento de la población en la Zona Metropolitana de Monterrey ha incrementado de una manera imprevista. Según datos del Instituto Nacional de Estadística, Censos y Costeos de Población y Vivienda en el año 2015 la población total de México era de 119 millones 938 mil 473 personas, de los cuales 5 millones 119 mil 504 personas residían en el estado de Nuevo León; además, la Zona Metropolitana de Monterrey (considerando los municipios de García, General Escobedo, Guadalupe, Monterrey, San Nicolás de los Garza, San Pedro Garza García y Santa Catarina) reunía 3 millones 314 mil 822 habitantes, el 64.75% de la población del estado (INEGI, 2015). Sin embargo, el Consejo Nacional de Población estima que el crecimiento poblacional del estado de Nuevo León para el año 2050 será aproximadamente entre 32.3% y 40.2% superior al crecimiento que tuvo en el 2018 (CONAPO, 2018).

Hoy en día existen reportes de investigación en los cuales se estudia la cantidad de recursos fósiles no renovables que se utilizan a nivel mundial para la generación de energía eléctrica. Por ejemplo, se han encontrado datos sobre la comparación del uso de esta energía versus la obtenida por fuentes renovables, así como la obtención de biogás como consecuencia del tratamiento de aguas residuales de diferentes procedencias (industria cervecera, industria láctea, industria de productos químicos, mercados de venta de alimentos, cafeterías universitarias, entre otras). Estos estudios llegan a conclusiones similares sobre las ventajas que trae el aprovechamiento de estos subproductos del agua residual. Así mismo, muestran un panorama global del aprovechamiento del biogás para la producción de energía eléctrica; dichos estudios contextualizan información desde

que surgieron las principales aplicaciones de estas tecnologías hasta las aplicaciones que se tienen en la actualidad en todo el mundo. También se mencionan algunas políticas que existen tanto en México como en otros países que favorecen el uso de energías renovables, y la literatura existente hace mención de los diferentes usos en los que el biogás pudiera ser materia prima.

A nivel mundial, las principales fuentes de energía que se utilizan son los hidrocarburos; sin embargo, éstos han mostrado que son recursos no renovables que con el uso desmedido y en el transcurso de los años presentarán una finitud. Además, su uso intensivo tiene un impacto al medio ambiente de dimensiones globales y catastróficas; es por esto que, México se ha comprometido a garantizar el desarrollo sostenible en el país mediante una visión de largo plazo en el aprovechamiento de las energías renovables y haciendo uso de la energía de una manera más eficiente.

Actualmente, en México se ha explotado muy poco el uso del biogás generado en las plantas de tratamiento de agua como una fuente renovable de energía, hecho por el cual no se han realizado estudios de investigación suficientes para conocer los beneficios que este tipo de soluciones pudieran traer para México y su compromiso con el desarrollo sostenible. Como se mencionó con anterioridad, existen investigaciones de otras partes del mundo en las que se ha aprovechado el biogás como fuente principal para la generación de energía eléctrica; sin embargo, son casos de estudio muy particulares, es decir, se analiza el tratamiento de agua residual de una muestra específica (la industria cervecera, la industria láctea, la industria de productos químicos, mercados de venta de alimentos, cafeterías universitarias) y no de una muestra mayor en las que se pueda utilizar esa agua residual como objeto de estudio (como por ejemplo una ciudad, una zona metropolitana). Así mismo, hacen falta investigaciones sobre el costo de la infraestructura necesaria para la generación de energía eléctrica a través del biogás, así como de la relación costo/beneficio de operar este tipo de tecnologías.

La intención de esta investigación es estudiar el biogás como un subproducto generado en las plantas de tratamiento de agua en el estado de Nuevo León y su uso como fuente de combustible para la generación de energía eléctrica y su aprovechamiento a futuro en las diferentes plantas de tratamiento de aguas residuales de la Zona Metropolitana de Monterrey. Para esto, inicialmente se recopilarán los datos cuantitativos para su análisis y detectar tendencias de consumo en el sector energético para después explicar a fondo los resultados cuantitativos. Además, se busca evaluar si las condiciones de las plantas de tratamiento de agua están preparadas para el procesamiento de

una mayor cantidad de aguas residuales ante un incremento poblacional en la Zona Metropolitana de Monterrey, ya que si la planta actualmente está cerca o en su capacidad total de operación instalada no servirá como objeto de estudio prospectivo.

## **JUSTIFICACIÓN**

El Consejo Nacional de Inteligencia (National Intelligence Council, 2012) en su publicación “Global Trends 2030: Alternative Worlds” establece como una megatendencia el crecimiento de alimentos, agua y energía (“Growing food, water, and energy nexus”) en el que se asegura que la demanda energética tendrá un aumento drástico de aproximadamente el 50 por ciento, durante los próximos 15 a 20 años como respuesta al rápido crecimiento económico en el desarrollo mundial.

En la Visión México 2030 (Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, 2007) se percibe un país que “utiliza con eficiencia las energías tradicionales y hace un uso cada vez más amplio de tecnologías limpias y energías renovables”, además se establece la meta de que “los mexicanos debemos refrendar el compromiso con la sustentabilidad ambiental y el uso responsable de recursos naturales, y alcanzar un 100% de tratamiento de aguas residuales para el año 2030”, ya que en la actualidad solamente el 35% de las aguas residuales en México son tratadas. Así mismo, en el marco de la Reforma Energética que tuvo México en el año 2013 se establece que el país podrá aprovechar sus recursos energéticos en una manera racional y sustentable en el que se impulsa el cuidado al medio ambiente fomentando la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables y tecnologías limpias (Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, 2013).

Esta investigación pudiera tener relevancia como fuente de estudio para el país ya con base en el cumplimiento de la Reforma Energética y en seguimiento de la Visión México 2030 y Las Tendencias Globales contribuirá en tomar las mejores decisiones en los temas energético y medio ambiental con el fin de poder optimizar y aprovechar de una manera sostenible los recursos e implementar el uso de fuentes de energía renovables. Así mismo, también pudiera presentar relevancia para los empresarios nacionales e internacionales que pudieran estar interesados en realizar inversiones en sus empresas con presencia en México, para la generación de energía eléctrica utilizando recursos renovables que actualmente no están siendo aprovechados en sus industrias, que en la actualidad representan un riesgo ambiental y pudiera representar un beneficio económico para ellos.

Por último, este proyecto ayudaría a analizar las políticas con las que se cuentan hoy en día en temas de sustentabilidad energética como el uso de fuentes renovables de energía. Además, permitirá

determinar si en realidad existen políticas que fomenten en desarrollo sostenible, si hace falta mejorar las políticas actuales para hacerlas más eficientes, o bien, la generación de una política que logre impulsar el uso de energías verdes.

## **OBJETIVO Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

### **OBJETIVO GENERAL**

Determinar si las plantas de tratamiento de aguas residuales “Dulces Nombres” y “Norte” pueden ser autosuficientes energéticamente al implementar el uso de biogás como fuente de energía para su operación, así como el impacto que pudiera tener que dicha implementación durante los próximos 24 meses.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estimar el volumen de aguas residuales a tratar ante el incremento poblacional que va a tener la Zona Metropolitana de Monterrey para determinar la capacidad necesaria de las plantas.
- Estimar la posible demanda de energía para la operación de las dos plantas de tratamiento de aguas residuales más importantes con las que cuenta el Estado de Nuevo León, “Dulces Nombres” y “Norte”, objeto de este estudio.
- Analizar la certidumbre del suministro eléctrico de autoconsumo para la operación de las plantas de tratamiento de agua residuales objeto de esta investigación.
- Examinar si existen las políticas energéticas que consideren una economía baja en combustibles fósiles y especificar cómo impactan/impactarían estas políticas en el consumo energético que incentiven a utilizar el biogás como una energía limpia.
- Determinar cómo pudiera ayudar las políticas públicas en acelerar el crecimiento de las energías renovables.
- Indicar de qué manera se puede aprovechar el biogás como fuente de combustible durante los siguientes 24 meses.

## **PALNTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Esta investigación busca determinar la eficacia de la implementación del uso de biogás como fuente de energía para el autoconsumo en dos de las plantas de tratamiento de aguas residuales con las que cuenta la Zona Metropolitana de Monterrey y cuál sería el impacto a nivel ambiental y económico que tendrá dicha implementación durante los siguientes 24 meses.

Para lograr lo anterior se buscará responder las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál será el volumen de aguas residuales que se necesitará tratar ante el inminente incremento poblacional que va a tener la Zona Metropolitana de Monterrey para los próximos 24 meses?
- ¿Cuál será la posible demanda de energía para la operación de las dos plantas de tratamiento de aguas residuales más importantes con las que cuenta el Estado de Nuevo León, “Dulces Nombres” y “Norte” para los próximos 24 meses?
- Al usar el biogás generado en las plantas de tratamiento de aguas residuales “Dulce Nombres” y “Norte” como fuente de combustible, ¿Existirá la certidumbre del suministro eléctrico para el autoconsumo?
- ¿Existen políticas energéticas que consideren una economía baja en combustibles fósiles? De ser así, ¿Cómo impactan/impactarían estas políticas en el consumo energético que incentiven a utilizar el biogás como una energía limpia?
- ¿Cómo pudiera ayudar las políticas públicas en acelerar el crecimiento de las energías renovables?
- ¿De qué manera se puede aprovechar el biogás como fuente de combustible durante los siguientes 24 meses?

## **HIPÓTESIS**

Con los pronósticos de series de tiempo será posible obtener una aproximación de la energía eléctrica que será generada aprovechando el biogás producido en las plantas de tratamiento de aguas residuales “Dulces Nombres” y “Norte”. Demostrando así la autosuficiencia energética de dichas plantas y el aprovechamiento de la energía residual para beneficio de la empresa Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey.

## **APORTACIÓN**

Este proyecto de investigación servirá como precedente para establecer los requisitos mínimos que deba tener una planta de tratamiento de agua para que sea autosustentable energéticamente. Exista una búsqueda en la optimización en el funcionamiento y operación de futuras plantas de tratamiento de agua que estén por desarrollarse en México y la determinación de la eficacia al implementar del uso de biogás como fuente de energía para el transporte y alumbrado público.



## CAPÍTULO II: MARCO CONTEXTUAL

En el año 2013 las fuentes primarias de energía a nivel mundial eran los hidrocarburos, correspondiendo al 81.2% de toda la energía primaria producida y consumida. En México, para el año 2011 el 91.2% de la producción de energía primaria era por medio de combustibles fósiles como materia prima, de los cuales el petróleo representaba el 64.1%, el gas el 24% y el carbón el 3.1%, teniendo un crecimiento en la demanda energética anual del 2.47%. De este consumo de energía el 19% correspondía al sector residencial, comercial y público, el 46% al sector transporte, el 27% al industrial y el 3% al sector agropecuario (Estrada Gasca, 2013). En los países desarrollados los biorresiduos de origen municipal pueden llegar a ser hasta del 40%, en cambio, en los países en vías de desarrollo oscila entre el 50 y el 60% (Parra Orobio et. al., 2016).

Según Estrada Gasca (2013) los factores que han permitido el desarrollo de los mercados de las fuentes de energía son: el alza de los precios de los hidrocarburos, el mercado de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el progreso acelerado que han tenido las tecnologías de energías renovables. Por otro lado, los factores que impiden el uso de estas fuentes renovables de energía se encuentran: el alto costo que representan las tecnologías para el aprovechamiento del biogás obtenido de las plantas de tratamiento de agua y a la ausencia de políticas de estado que las promueva y las incentive.

En el sector energético, los dos temas que han tomado mayor importancia y que han estado en debate a nivel mundial en los últimos años son los efectos negativos a la salud humana y al medio ambiente, debido a la contaminación, acidificación de bosques, suelos, ríos y lagos; además de las emisiones de gases de efecto invernadero (entre los que se encuentran en mayores concentraciones el dióxido de carbono, óxido nitroso y metano) que son emitidos a la atmósfera y que cada vez se siguen incrementando como resultado de las actividades humanas, que contribuyen al cambio climático debido a la quema y uso desmedido de combustibles fósiles y provocan el calentamiento global.

Según Islas Samperio et. al. (2013) se prevé un riesgo en las economías del mundo debido a que el cenit del petróleo representaría el fin del petróleo barato lo que implicaría como consecuencia el encarecimiento de bienes y servicios, inflación, desempleo, recesión, entre otros y a un eventual desabasto de petróleo. En relación con México, al ritmo de producción actual, las reservas probadas de petróleo alcanzarían para 10.63 años y para gas natural 8.9 años.

El sector eléctrico es el sector al cual se le responsabiliza de generar el 37% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial; así mismo, las energías fósiles (carbón, petróleo y gas) representan el 67% de la generación eléctrica. En México las emisiones del sector eléctrico representan poco más del 31% y las energías fósiles representaron el 80% de la generación eléctrica. Es por ello que los países han reconocido cambiar los sistemas energéticos no sustentables y se ha fomentado el desarrollo de nuevas fuentes de energía, en particular las que provengan de fuentes renovables. En la actualidad existen diversas fuentes renovables de energía que se utilizan para la producción de energía eléctrica, entre las que se encuentran la energía eólica, la energía solar (fotovoltaica y térmica), la geotérmica, la biomasa (biomasa sólida, biomasa líquida y biogás), la hidroelectricidad (micro, mini, pequeña y gran escala) y la oceánica (olas, corrientes, mareas, gradientes térmicos y de salinidad). A nivel mundial esas fuentes representan el 18% de la producción de electricidad, mientras que en México estas tecnologías representan solamente el 16% (Islas Samperio et. al., 2013).

Bitar (2015) define en la Tabla 1 las seis tendencias mundiales que considera relevantes para América Latina; entre ellas podemos identificar que cuatro de ellas pueden ser de interés para nuestro tema, como lo son la escasez de recursos naturales, transformaciones demográficas, urbanización y expansión de ciudades y cambio climático. Como se ha comentado a lo largo de este proyecto de investigación, el crecimiento de la Zona Metropolitana de Monterrey está en continuo crecimiento dado que es una de las zonas más importantes económicamente hablando, por lo que la migración hacia esta zona va incrementando constantemente, de tal manera que para satisfacer las necesidades de esta población cada vez se hace uso de una mayor cantidad de recursos naturales, en especial del agua, que si bien es un recurso esencial, también es finito y que cada vez es más escaso, por lo que se tiene que comenzar a trabajar en un cambio de comportamiento sobre este recurso y comenzar a utilizar las aguas tratadas para consumo en actividades que lo permitan, así como la generación y utilización de energías limpias.

**FIGURA 1. SEIS TENDENCIAS MUNDIALES RELEVANTES PARA AMÉRICA LATINA**

|                                             |                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tecnologías Disruptivas</b>              | • Aquellas en gestación y cuya difusión transformaría sustancialmente la producción, el empleo, el bienestar, la gobernabilidad y las relaciones humanas.              |
| <b>Escasez de Recursos Naturales</b>        | • Agua, alimentos, energía y minerales; cambios en la demanda e innovaciones tecnológicas.                                                                             |
| <b>Transformaciones demográficas</b>        | • Desplazamiento del poder, nuevos mercados, clases medias en ascenso, migraciones.                                                                                    |
| <b>Urbanización y expansión de ciudades</b> | • Concentración de la población, demanda de infraestructura y servicios básicos, calidad de vida, competitividad de las ciudades.                                      |
| <b>Cambio Climático</b>                     | • Efectos en la agricultura, oportunidades de crecimiento verde, conciencia ciudadana y cambios de comportamiento.                                                     |
| <b>Gobernabilidad democrática</b>           | • Ciudadanos globales interconectados, impacto de nuevas tecnologías en las relaciones sociales, transparencia, seguridad, violencia y crimen organizado, ciberataques |

*Fuente: Bitar, 2015*

## **ENERGÍAS LIMPIAS**

La Ley de la Industria Eléctrica, define a las energías limpias como “aquellas fuentes de energía y procesos de generación de electricidad cuyas emisiones o residuos, cuando los haya, no rebasen los umbrales establecidos en las disposiciones reglamentarias que para tal efecto se expidan; ...”. (EY México, 2018).

## **IMPORTANCIA DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

El cambio climático y la escasez del agua son dos de los mayores problemas que amenazan a la población a nivel mundial. Según la Organización Mundial de la Salud aproximadamente el 27% de la población mundial se abastece de una fuente de “agua potable” que está contaminada, la cual puede transmitir enfermedades que ponen en riesgo la salud de las personas; estimando que el agua contaminada provoca alrededor de 502 000 muertes por diarrea al año (OMS, 2019).

Además, se estima que para el año 2025, la mitad de la población mundial vivirá en zonas con escasas de agua. De igual manera, la Organización Mundial de la Salud establece que en los últimos 50 años el consumo de combustibles fósiles ha contribuido a la liberación de una gran cantidad de gases de efecto invernadero que ha generado una alteración al clima mundial, estimando que entre

el año 2030 y 2050 el cambio climático pudiera estar causando aproximadamente 250 000 defunciones anuales debido a problemas relacionados con el cambio climático (OMS, 2018).

La Estrategia Ambiental Nacional vigente de La Habana, Cuba, identifica el deficiente manejo de las aguas residuales generadas por la población, las actividades productivas y de servicios (dado por la baja cobertura de tratamiento de las aguas residuales), el estado técnico de los sistemas de tratamiento existentes, la carencia de programas de minimización de residuos en la fuente de origen y los bajos niveles de reuso de los efluentes, entre otros como los principales factores que contribuye de manera más significativa al fenómeno de la contaminación ambiental (López et. al., 2010).

En la mayoría de los casos, los lodos generados producidos en las plantas de tratamiento de agua son descargados directamente al drenaje o son desechados, sin que se les realice algún tipo de tratamiento previo, en presas, terrenos y, en menor medida, son dispuestos en lagunas y rellenos sanitarios. La causa de esta situación es la falta de recursos para llevar a cabo el tratamiento de los lodos, aunado a que no existen suficientes normativas que controlen su reutilización de forma favorable (Amador Díaz et. al., 2015).

Diariamente se generan grandes volúmenes de estos lodos en las plantas de tratamiento de aguas residuales, los cuales cuentan con una carga de microorganismos patógenos que constituyen un riesgo para la salud. Debido a las exigencias en depuración de las aguas residuales, para garantizar el cumplimiento de las regulaciones y normativas nacionales e internacionales, estas son sometidas a tratamientos más rigurosos, con el objetivo de remover sus contaminantes; por lo tanto, la contaminación de los lodos tiende a un incremento (Amador Díaz et. al., 2015).

En el caso de las aguas residuales, cada vez existe un mayor interés por mejorar las plantas de tratamiento de aguas residuales, además de la implementación de sistemas de reuso y reciclaje. Así mismo, se busca utilizar los subproductos, tales como los lodos y el biogás (Hernández et. al., 2014) que son generados durante los procesos mecánicos, biológicos y químicos de purificación de las aguas servidas en las plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales contienen una gran cantidad de materia orgánica, microorganismos, macro y micronutrientes, así como metales pesados y agua (Amador Díaz et. al., 2015).

En la actualidad el tema del tratamiento de agua residual tiene un enfoque lineal, es decir, consiste en obtener el agua de una fuente principal, tratarla para su consumo, una vez utilizada es descargada, tratada y vertida a las fuentes naturales de agua.

En el informe Aguas Residuales: De residuo a recurso, se menciona que “El desarrollo urbano futuro necesita enfoques que minimicen el consumo de los recursos y que se centren en la recuperación del recurso, siguiendo los principios de la llamada economía circular. En este contexto, las aguas residuales son y deben considerarse un recurso valioso a partir del cual pueden extraerse energía y nutrientes, así como ser una fuente adicional de agua” (Rodríguez et. al., 2020).

Al hacer uso de los principios de economía circular en la gestión de las aguas residuales pueden ayudar a que los procesos de las Plantas de Tratamiento de Agua pasen de ser servicios costos a servicios autosostenibles. Una de las principales ventajas de adoptar los principios de economía circular en la gestión de aguas residuales es que la recuperación y el nuevo uso del recurso podrían transformar el saneamiento de ser un servicio costoso a uno que es autosostenible y añade valor a la economía.

El tratar el agua residual como un recurso, permite que se logren diferentes Objetivos de Desarrollo Sostenible que tiene el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, “los cuales son un llamado para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad para 2030” (Naciones Unidas, 2015). En la Figura 2, se muestran los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible.

**FIGURA 2. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE**



Fuente: Programa de las Nacionales Unidad Para el Desarrollo, 2015

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible que se logran, ya sea de manera directa o indirecta, se mencionan a continuación:

- ODS #6, “Agua Limpia y Saneamiento” cuyo objetivo es garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.
- ODS #7, “Energía Asequible y no Contaminante” cuyo objetivo es garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos.
- ODS #9, “Industria, Innovación e Infraestructura” cuyo objetivo es construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.
- ODS #11, “Ciudades y Comunidades Sostenibles” cuyo objetivo es lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.
- ODS #12, “Producción y Consumo Responsables” cuyo objetivo es garantizar modalidades de consumo y producción sostenible.
- ODS #13, “Acción por el Clima” cuyo objetivo es adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

## **SITUACIÓN DEL BIOGÁS**

### **INTERNACIONAL**

A nivel mundial la producción de biogás ha aumentado aproximadamente entre 4.5% y 5%, siendo Alemania el país mayor productor de este combustible en Europa. Dinamarca es uno de los países que han llegado a sus tasas máximas de valorización de biogás a partir de los lodos que se obtienen del tratamiento de las aguas residuales considerando como base las capacidades de la población; por otro lado, Italia, España y Francia son los países que tienen la menor producción de biogás en las plantas de tratamiento de agua en base a sus capacidades de la población. Los países de la Unión Europea como República Checa, Hungría, Polonia, Eslovenia y Eslovaquia han mejorado notablemente la gestión del biogás (Bodík et. al., 2010).

Según Makisha (2016), cada vez son más los sistemas de tratamiento anaeróbico de aguas residuales que se están implementando de forma intensiva en las plantas de tratamiento de agua en todo el mundo. En la última década, se han puesto en servicio más de 300 estaciones de biogás en todo el continente europeo, siendo estas estaciones las que pueden producir más de 30 mil millones de kWh de energía eléctrica y 40 mil millones de kWh de energía térmica.

En cuanto a la eficiencia térmica que se produce del gas en los reactores de digestión anaeróbica, es de aproximadamente 6.5 kWh/m<sup>3</sup> en comparación con la eficiencia de 10 kWh/m<sup>3</sup> que tiene el gas natural (Makisha, et. al. 2018). En 2005 fue inaugurada en Suecia un “Modelo ecológico”, el cual también es llamado como tecnología Biomar, la cual es la primera Estación de Depuración de Aguas Residuales en Europa que funciona bajo esta ecología, tecnología segura y eficiente en el campo de energía.

El biogás que se obtiene, además se utiliza además como un recurso energético para suministrar electricidad a otras industrias. Así, esta tecnología toma en consideración cuestiones ecológicas (al realizar un tratamiento de las aguas residuales) y económicas (al producir y comercializar la energía) (Makisha, 2016); además, en la actualidad se utiliza o se están en desarrollo alrededor de 60 diferentes tipos de tecnologías de biogás. Sin embargo, estas tecnologías aún no son perfectas, pero sí tienen ventajas significativas para el futuro (Makisha, et. al. 2018).

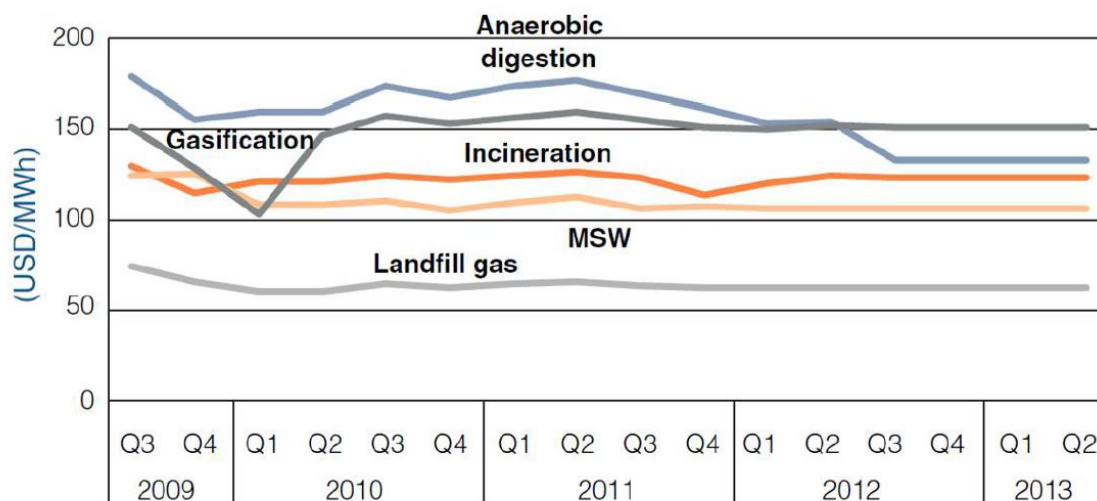
El Reporte de Inteligencia Tecnológica (IMP, 2020), identifica los puntos relevantes del biogás a nivel internacional, entre los que se encuentran:

- A nivel mundial, hubo un incremento en el interés del aprovechamiento del biogás como fuente de energía durante los últimos 15 años, por lo que hay países que tienen un mayor trabajo de investigación y desarrollo sobre el tema, políticas y apoyos gubernamentales que promueven su uso.
- Las regiones y países, donde la producción de biogás se ha ido incrementando son Europa (Alemania, Italia, Francia, Reino Unido, Dinamarca, ...), Asia (China e India) y “Norte”américa (Estados Unidos)
- Entre los usos que le dan al biogás en las diferentes regiones prevalecen:
  - Generación de electricidad como suministro para el transporte a través de una planta de biometano (Europa)
  - Generación de electricidad para consumo (Estados Unidos)
  - Como medio para medio de calentamiento para cocinar (Asia)

En la Figura 3 se representa el costo nivelado de energía para producir energía eléctrica por biomasa (Anaerobic digestion) de las principales tecnologías comerciales, donde se puede observar que entre el segundo semestre de 2009 y el primer semestre de 2013 tuvo un descenso de aproximadamente

el 25% en el costo por MWh generado, lo cual hace que sea una opción competitiva contra otra fuente de combustible.

**FIGURA 3. COSTO NIVELADO DE ENERGÍA PARA PRODUCIR ENERGÍA ELÉCTRICA POR BIOMASA DE LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS COMERCIALES**



Fuente: World Energy Council, 2013

### NACIONAL

El Reporte de Inteligencia Tecnológica (IMP, 2020) menciona que a nivel nacional, no existe una meta en específico sobre el tema de aprovechamiento del biogás, pero se ha establecido como objetivo nacional en la Ley de Transición Energética para las fuentes de energía limpia que “la Secretaría de Energía fijará como meta una participación mínima de energías limpias en la generación de energía eléctrica del 25 por ciento para el año 2018, del 30 por ciento para el año 2021 y del 35 por ciento para el año 2024”. Por otro lado, EY México (2018), establece que las metas que tiene México para la generación de electricidad mediante energías limpias se muestran en la Figura 4.

**FIGURA 4. METAS PARA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A TRAVÉS DE ENERGÍAS LIMPIAS**



Fuente: Ministerio Federal de Economía y energía de Alemania y SENER.



En la Figura 5, podemos observar la distribución de fuentes potenciales para la producción de biogás provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, siendo Nuevo León uno de los estados con ese potencial.

**FIGURA 5. FUENTES POTENCIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS PROVENIENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.**



*Fuente: REMBIO, 2012*

## **USOS Y BENEFICIOS**

Existen cuatro tipos principales de aplicaciones en las que el biogás puede ser utilizado: la primera es para la producción de calor y vapor; la segunda es para la generación y/o co-generación de electricidad; la tercera, se puede usar como combustible vehicular; y la cuarta para la producción de productos químicos (Bodík et. al., 2010).

Según Rössel et. al. (2013) el uso del biogás en la generación de energía alterna a la de los combustibles fósiles, tiene un cúmulo de ventajas, entre las que se encuentran la prevención de la descarga de metano hacia la atmósfera, la mejora de la situación ambiental actual y, además, es una fuente adicional para la producción de electricidad, calor y gasolina; sin embargo, invariablemente su uso es acompañado del problema de recaudación de una cantidad de biomasa suficiente para obtener energía de una manera constante.

Por otra parte, Makisha (2016) señala que entre las ventajas de la digestión anaeróbica del agua residual se encuentra la eficiencia ecológica, las concentraciones de contaminantes en la descarga que ya cumplen con los requerimientos normativos; por lo tanto, no hay multas por superar los

límites, producción de energía, disminución en las emisiones del biogás al aire, además de una eficiencia económica: Sin embargo, el biogás es un combustible que minimiza las emisiones nocivas al medio ambiente mas no las elimina por completo.

El biogás puede ser utilizado en la producción de energía para consumo doméstico, instalaciones de tratamiento de agua y/o energía en la red eléctrica (Mikisha, et. al., 2018), como combustible en equipos comerciales diseñados para su funcionamiento con gas natural o propano (como son los calentadores, lámparas, estufas, refrigeradores, etc.). No obstante, no cabe duda de que el uso más interesante que puede tener el biogás en estos momentos es en la generación de electricidad y de calor, ya sea de manera individual o conjunta. El biogás con un grado medio de pureza puede llegar a ser utilizado en motores de combustión interna y turbinas de gas, esto a través de celdas de combustible o de hidrógeno y representan una tecnología prometedora para la producción de energía eléctrica. Es importante notar que esta tecnología fue desarrollada inicialmente para utilizar gas natural y que, puede utilizar biogás debido a su menor impacto ambiental, su menor consumo y a la obtención de un rendimiento aceptable, siempre y cuando éste se encuentre libre de impurezas y con un alto contenido de hidrógeno (Rössel et. al., 2013).

Una de las primeras aplicaciones registradas del uso del biogás en el sector energético data de finales del siglo XIX en Exeter Inglaterra; el gas producido por una planta tratadora de aguas municipales era empleado en el alumbrado público. Durante los primeros años y hasta mediados del siglo XX el tema de la producción de biogás fue abordado ampliamente, pero a su vez abandonado debido a que representaba un alto costo y una poca factibilidad (Hernández et. al., 2014). En cambio, los digestores de lodos más antiguos en Francia han estado en funcionamiento desde finales de la década de 1940; sin embargo, el 17% de los digestores que actualmente se encuentran en funcionamiento datan de 1970. Hasta esta fecha, el biogás que era producido en estos digestores no era explotado económicamente, debido a que es un gas con un olor demasiado desagradable, tóxico y difícil de reutilizar (Bodík et. al., 2010).

Según Gu, Y. et. al., (2017) las plantas de tratamiento de agua son clasificadas frecuentemente como las principales empresas de consumo de energía eléctrica por municipio; representan un gasto total entre el 25% y el 40% los costos del consumo de energía y que se prevé que este porcentaje aumente en un 20% en los próximo 15 años; razón por la que en los últimos años se han comenzado a construir plantas de tratamiento de aguas residuales autosuficientes energéticamente y a analizar la reducción de costos de operación y consumo de energía. Sin embargo, la demanda de energía

que genera una planta de tratamiento de agua se ve afectada por la ubicación de la planta, el tamaño de carga hidráulica, tipo de proceso de tratamiento que se utiliza, requisitos de calidad del agua una vez tratada, antigüedad de la planta, experiencia del personal, entre otras.

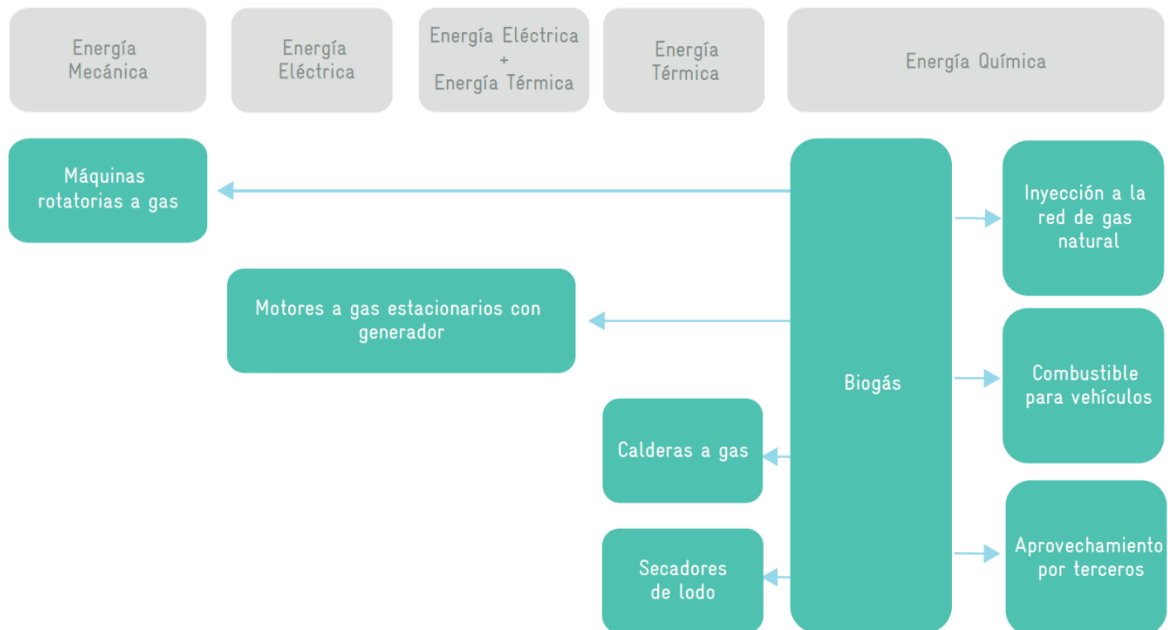
En la actualidad, el biogás que se genera en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales en Moscú está siendo utilizada para la generación de vapor en las calderas de la planta, donde el 75% de este vapor se consume para calentar los digestores y el 25% restante para calentar las habitaciones y calderas de agua caliente (Makisha, et. al. 2018). Por otro lado, Gu, Y., et. al., (2017) mencionan que, a nivel mundial, 12 plantas de tratamiento de agua residual han alcanzado una autosuficiencia energética del 90%, ubicándose la mayoría de ellas en los Estados Unidos de América. Entre ellas destaca la planta de tratamiento ubicada en Oakland, California que recibe un caudal de 70 millones de galones por día y comenzó produciendo en un inicio el 70% de biogás; sin embargo, en 2012 aumentó su capacidad de producción de energía eléctrica y actualmente satisface en un 126% de su demanda de energía eléctrica, por lo que el excedente de electricidad generada es suministrado a la red de electricidad. Otro ejemplo de una planta autosuficiente de energía al 100% es la planta de tratamiento de aguas residuales de Sheboygan (Gu, Y., et. al., 2017).

Para poder hacer uso de energía eléctrica producida mediante biogás obtenida de las plantas de tratamiento de agua, Estrada Gasca (2013) menciona que deberá ser considerado “que exista una seguridad en el suministro eléctrico, tener conocimiento de las reservas energéticas con las que se cuenta, los precios y costos, la minimización del impacto ambiental de los sistemas eléctricos” (p. 78).

## **USOS**

La Secretaría de Energía (SENER, 2017), en su Mapa de Ruta Tecnológica Biogás establece que el biogás puede ser utilizado para la generación de electricidad, la generación de calor o vapor y como combustible para vehículos. El Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México (ENRES, 2017) coincide en que la conversión de la energía química en energía eléctrica y/o térmica, permitiría que éstas fueran provechadas por las Plantas de Tratamiento de Aguas para su operación. Además de tener otros usos, los cuales podemos observar en la Figura 6.

**FIGURA 6. USOS DEL BIOGÁS**



*Fuente: Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México (ENRES, 2017).*

## **BENEFICIOS**

Dentro de los beneficios que la Secretaría de Energía (SENER, 2017) identifica que:

- El biogás da seguridad energética, ya que permite dejar de depender de combustibles fósiles, así como cumplir con los compromisos pactados sobre el desarrollo de energías sostenibles.
- El biogás ayuda al cuidado del medio ambiente, ya que la combustión del metano, principal componente del biogás no genera contaminantes como hollín ni cenizas. Además de que reduce los costos generados por el mantenimiento a las plantas de tratamiento de agua.
- El biogás ayuda a reducir el impacto de gases de efecto invernadero, ya que para el año 2017 se estimaba que se generaban 30 millones de toneladas anuales de metano, sin embargo, gracias al aprovechamiento del biogás se pudieran estar evitando la emisión de 13 toneladas anuales de metano.
- El usar el biogás como fuente para la generación de energía eléctrica para autoconsumo, trae consigo beneficios económicos, ya que se reduciría el costo de adquisición de energía, además de tener la posibilidad de vender la energía sobrante.

En la Tabla 1 se muestran los beneficios que el Reporte de Inteligencia Tecnológica (IMP, 2020) asocia con el aprovechamiento del biogás.

**TABLA 1 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR BIOMASA Y PARTICIPACIÓN DEL BIOGÁS.**

| Tipo       | Beneficios                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Energético | Producción de energía eléctrica<br>Uso directo (es decir, cocción de alimentos)                                                                                                                                                                                               |
| Económico  | Ahorros en generación eléctrica y usos térmicos<br>Posible negociación de Certificados de Energía Limpia (Bonos de Carbono)<br>Reducción de los derechos de descarga de aguas residuales.<br>Aplicación de biofertilizantes en el campo.                                      |
| Ambiental  | Reducción de las emisiones de GEI<br>Complemento en dependencia en el uso de energía y combustibles<br>Reducción de la cantidad de contaminantes en aguas residuales.<br>Eliminación de olores / vectores que transmiten enfermedades.<br>Disminución de insectos y roedores. |

Fuente: Reporte de Inteligencia Tecnológica (IMP, 2020)

En el informe Aguas Residuales: De residuo a recurso (Rodríguez et. al., 2020), se mencionan los flujos de ingresos adicionales o ahorros en costos que se pudieran tener al aprovechar el biogás como recurso, los cuales se muestran en la Figura 7.

**FIGURA 7. FLUJOS POTENCIALES DE INGRESOS Y AHORROS DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO PARA LA RECUPERACIÓN DE LOS RECURSOS.**



FUENTE: Aguas Residuales: De residuo a recurso (Rodríguez et. al., 2020)

## MARCO REGULATORIO EN ENERGÍAS RENOVABLES

Por un lado, Madlener et. al., (2005) plantean que al interrelacionarse los sistemas socioeconómicos y ambientales es necesario que los impactos de las actividades humanas en el ambiente deban minimizarse, así como mantener el bienestar de los seres humanos; mencionan además que la medida para reducir estos impactos es la utilización de instrumentos de política. Por esta razón Fuchs en Islas Samperio et. al. (2013) incluyen en esta perspectiva de apoyo a las fuentes renovables tanto a la oferta como a la demanda de energía; también afirman que “la intervención de política es necesaria para ayudar a productores y consumidores se muevan hacia trayectorias tecnológicas renovables y dar soporte a la difusión de estas tecnologías en el mercado” (p. 3).

Menanteau, et al. (2003) y Finon et. al., (2007) coinciden en que está justificada la utilización de instrumentos de soporte a las fuentes renovables de energía debido a que éstas contribuyen a la preservación de bienes públicos, tales como aire limpio y estabilidad climática; sin embargo, Menanteau (2003) indica que “los actores privados no están preparados para invertir en algo por lo cual cada quien puede actuar libre de cargo”.

De acuerdo con Islas Samperio et. al. (2013) los subsidios anuales totales para los combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas en 27 países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico fueron de 57 billones de dólares americanos, mientras que en 22 países que no pertenecen a la misma organización fueron de 94 billones de dólares americanos; por otro lado, las energías renovables y eficiencia energética recibieron 9 billones de dólares americanos en los países pertenecientes a la Organización.

La Secretaría de Energía (SENER, 2018) establece que en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos se encuentran los Artículos para la implementación de proyectos de energías renovables, mismos que se muestran en el Figura 8.

**FIGURA 8. ARTÍCULOS DE LA CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS DE ENERGÍAS RENOVABLES.**

|                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Artículo 4<sup>to</sup></b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• "... Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de los dispuesto por la ley. ..."</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Artículo 25<sup>o</sup></b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• "Corresponde al Estado la rectoría del desarrollo nacional para garantizar que éste sea integral y sustentable, que fortalezca la Soberanía de la Nación y su régimen democrático y que, mediante el fomento del crecimiento económico y el empleo y una más justa distribución del ingreso y la riqueza, permita el pleno ejercicio de la libertad y la dignidad de los individuos, grupos y clases sociales, cuya seguridad protege esta Constitución".</li> </ul>                                        |
| <b>Artículo 26<sup>o</sup></b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• "El Estado organizará un sistema de planeación democrática del desarrollo nacional que imprima solidez, dinamismo, permanencia y equidad al crecimiento de la economía para la independencia y la democratización política, social y cultural de la Nación".</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Artículo 27<sup>mo</sup></b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• "... Corresponde exclusivamente a la Nación la planeación y el control del sistema eléctrico nacional, así como el servicio público de transmisión y distribución de energía eléctrica; en estas actividades, no se otorgarán concesiones, sin perjuicio de que el Estado pueda celebrar contratos con particulares en los términos que establezcan las leyes, mismas que determinarán la forma en que los particulares podrán participar en las demás actividades de la industria eléctrica..."</li> </ul> |

Fuente: SENER (2018)

Así mismo, en la Figura 9 observamos las principales leyes para la planeación energética y su regulación que establece la Secretaría de Energía (SENER, 2018),

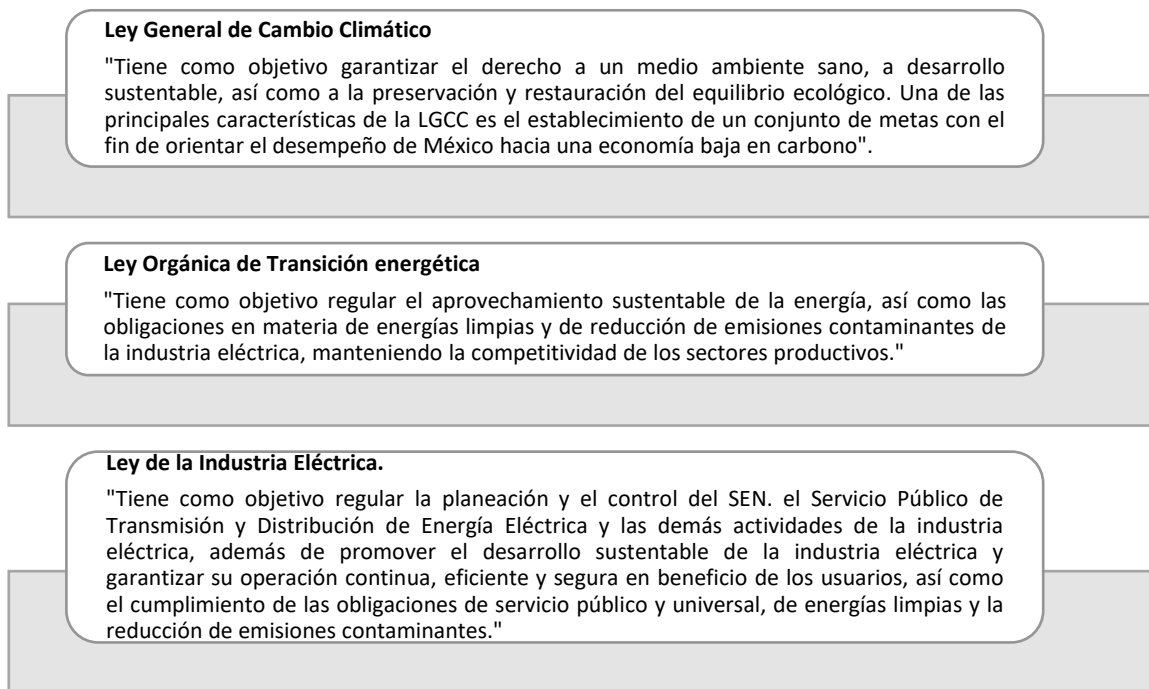
**FIGURA 9. PRINCIPALES LEYES PARA LA PLANEACIÓN ENERGÉTICA Y SU REGULACIÓN.**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Ley de Planeación</b></p> <p>Establece normas y principios para orientar la Planeación Nacional del Desarrollo, así como las bases para el funcionamiento del Sistema Nacional de Planeación Democrática. Asimismo y de acuerdo al Artículo 4<sup>to</sup> de la Ley corresponde al Ejecutivo Federal conducir la planeación del desarrollo nacional.</p> |
| <p><b>Ley Orgánica de la Administración Pública Federal</b></p> <p>Señala que corresponde a la SENER establecer, conducir y coordinar la política energética del país. Para ello, la SENER deberá dar prioridad a la seguridad y diversificación energética, así como al ahorro de energía y protección del medio ambiente.</p>                                 |
| <p><b>Ley de los Órganos Reguladores Coordinados en Materia Energética</b></p> <p>Sienta las bases para la organización y funcionamiento de los Órganos Reguladores Coordinados, que son la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) y la CRE</p>                                                                                                               |

Fuente: SENER (2018)

En la Figura 10, se identifican los objetivos de las leyes que promueven un mayor uso de energías renovables que establece la Secretaría de Energía (SENER, 2018).

#### **FIGURA 10. OBJETIVOS DE LAS LEYES QUE PROMUEVEN UN MAYOR USO DE ENERGÍAS RENOVABLES**



*Fuente: SENER (2018)*

Del Río en Islas Samperio et. al. (2013) analiza algunos de los impactos del desarrollo de energías renovables en varios aspectos tales como:

- La creación de empleos: Las energías renovables tienen dos tipos de efectos, "el efecto de expansión" debido a la producción y a las inversiones de estas energías, y el otro, "el efecto de contracción" debido al incremento en los precios de electricidad como resultado de costos más altos de las energías renovables y que pudieran hacer caer la demanda de energía y como consecuencia aumentar el desempleo.
- Impactos socioeconómicos: Se puede tener como impacto una diversificación productiva en regiones menos desarrolladas y aumentar su nivel de competitividad (p. 4).

Islas Samperio et. al. (2013) señalan que "los instrumentos utilizados por el Estado para el fomento del desarrollo económico parte de políticas o áreas de política dado que "los Estados se valen de las políticas como un medio para influir en el comportamiento de las empresas y así dar forma al desarrollo industrial" sectorial" (p. 4); mientras que Pfaffenberger, et al., (2006) mencionan que los



instrumentos de promoción de las fuentes renovables de energía se pueden distinguir en las siguientes 4 categorías: instrumentos institucionales, regulación de precios, regulación de cantidades (cuotas) y medidas voluntarias.

En el tema de ingreso público, la medida fiscal que es más utilizada para las fuentes renovables de energía, está relacionado con los impuestos ecológicos que se dividen en impuestos a la energía y al dióxido de carbono, siendo estos últimos los que utilizan los países cuando requieren de reducir las emisiones de dióxido de carbono u otro tipo de gases de efecto invernadero como lo son el óxido nitroso y el metano; mientras que el tema de egreso público hace referencia al soporte a nivel gubernamental que se da de dos formas: inversiones públicas o subsidios.

Es así que los ingresos por impuestos ecológicos pueden utilizarse para incrementar los ingresos del Estado, financiar esquemas de promoción para las fuentes renovables de energía, o en su caso, reducir las cargas fiscales en otros campos. Algunas desventajas que traen consigo este tipo de impuestos son:

- Creación de problemas financieros para personas de bajos ingresos.
- Deterioro de las condiciones en la competencia internacional de las industrias con alto consumo de energía.
- El efecto que las fuentes renovables de energía pueden ser bajo debido a que otras opciones pueden ser más efectivas económicamente hablando.

Sin embargo, las medidas voluntarias son los esfuerzos por parte de consumidores finales o industrias para la aplicación de las fuentes renovables de energía o ahorro de energía de manera voluntaria y que se basan en información y educación.

De Lovinfosse en Islas Samperio et. al. (2013) señala que una forma de caracterizar a los instrumentos de fomento para el uso de fuentes renovables de energía en el sector eléctrico está conformada por tres elementos:

Los actores a los cuales va enfocado el instrumento de política que son el grupo objetivo: Los instrumentos de política apuntan a influenciar el comportamiento de un grupo específico de actores o grupo objetivo. Los grupos objetivos son los actores cuyo comportamiento necesita ser modificado para alcanzar metas de política determinadas.

Los incentivos utilizados para alcanzar el objetivo de política: debido a que los instrumentos de política apuntan a alcanzar los objetivos de la política por el uso de incentivos específicos diseñados para inducir una modificación en el comportamiento de los actores.

Los recursos financieros movilizados por el instrumento: Diferentes criterios pueden aplicar acerca de cómo caracterizar los recursos: la naturaleza del recurso (información, organización, autoridad, legitimidad, dinero), el efecto de los recursos (redistribución entre los actores), y el origen de los recursos (público versus privado) (p. 7).

Estrada Gasca (2013) plantea un escenario para el año 2030 en el que dice que habrá nuevas políticas energéticas que consideren una economía baja en carbón, así como una tendencia de disminución del petróleo y del carbón, mientras que el gas tendrá una tendencia en aumentar, así como una tasa mayor de energías renovables que irán creciendo y penetrando mercados mundiales. Así mismo, plantea un escenario para el año 2040 en la que la demanda mundial del petróleo (p. 78).

En la actualidad las energías renovables pueden cubrir hasta un 50% de la demanda energética mundial mediante el uso de fuentes renovables de energía; por lo tanto, México requiere un cambio de paradigma energético que permita entrar a la transición energética y de esta manera sean las energías renovables una solución importante para la resolución del problema energético que se tiene en la actualidad en el país con respecto a su desarrollo sustentable. Sin embargo, para lograr estos objetivos, es necesario realizar un esfuerzo en conjunto de apoyo a la investigación, el desarrollo y la educación, ya que las energías renovables son una gran oportunidad para la innovación, el desarrollo científico, tecnológico, económico y social de México.

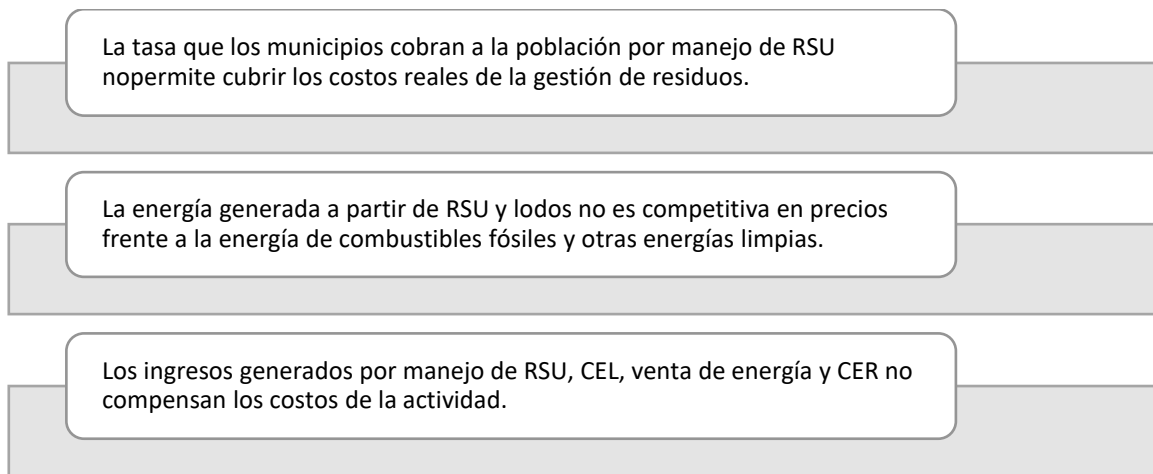
#### **BARRERAS PARA EL DESARROLLO DE LOS BIOCOMBUSTIBLES.**

La Secretaría de Economía (SENER, 2017) identifica cinco tipos de barreras para la industria del biogás, entre las que están:

- Barreras en el ámbito regulatorio: a México le hacen falta normas a nivel nacional que se encarguen de regular la producción y el manejo del biogás, por lo que propone la creación de normas nacionales que eliminen esta barrera, o bien, adecuar las normas ya existentes que sean aplicables al metano.

- Barreras en el ámbito económico: no cuenta con difusión de esquemas de los financiamientos que se encuentran disponibles para proyectos relacionados a la producción del biogás, además de que le hace falta desarrollar el mercado de biometano.
- Barreras en el ámbito social: no se cuenta con la sensibilización de la sociedad hacia el problema al medio ambiente que estamos generando al no disponer los residuos adecuadamente, además de que existe un desconocimiento de los beneficios que pudiera tener el aprovechamiento del biogás.

**FIGURA 11. PRINCIPALES BARRERAS PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA EN MÉXICO**



*Fuente: Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México (ENRES, 2017)*

**ESTIMACIÓN DE AHORRO EN ENERGÍA ELÉCTRICA**

Según el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, se identificó que muchas de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales presentan problemas debido a diferentes factores entre los que se encuentran; problemas de operación, gastos de operación inferior al caudal de diseño, calidad del agua a tratar con concentración de materia orgánica diferente a la caracterización de diseño, y dilución del influente durante la temporada de lluvias o por filtración a la red de alcantarillado (IMTA, 2016).

Así mismo, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua establece que la producción del biogás es directamente dependiente de tres aspectos; el caudal de agua a tratar, a la materia orgánica en el influente y a la modalidad del proceso. Por lo tanto, a mayor cantidad del caudal y a la materia orgánica del influente, será mayor la cantidad de biogás generado (IMTA, 2016).

El Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México publica otros datos sobre el potencial de generación de energía eléctrica para cada una de las plantas de tratamiento de agua, los cuales se muestran en la Tabla 2 (ENRES, 2017).

**TABLA 2. PTAR EN MÉXICO CON CAPACIDAD POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.**

| Nombre PTAR      | Estado     | Flujo de diseño L/s | Producción de biogás M <sup>3</sup> /d | Producción de energía eléctrica kWh/d | Capacidad de generador kW |
|------------------|------------|---------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| “Norte”          | Nuevo León | 3,000               | 15,505                                 | 32,250                                | 1,613                     |
| “Dulces Nombres” | Nuevo León | 5,000               | 41,680                                 | 86,695                                | 4,335                     |

*Fuente: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2016)*

En la Tabla 3 el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua presenta una estimación de la reducción en la cantidad de emisiones para cada una de las plantas de tratamiento de agua que estamos abordando en esta investigación, considerando la cantidad de biogás que cada una puede producir bajo las condiciones de operación de las plantas (IMTA, 2016).

**TABLA 3. REDUCCIÓN DE EMISIONES DE LAS PTARS POR NO UTILIZAR LA RED CONVENCIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA. IMTA (2016)**

| Nombre           | Estado     | Energía kWh | Energía MWh año <sup>-1</sup> | Reducción de Emisiones t CO <sub>2</sub> e año <sup>-1</sup> |
|------------------|------------|-------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| “Norte”          | Nuevo León | 2,691.58    | 23,578.24                     | 10,798.83                                                    |
| “Dulces Nombres” | Nuevo León | 6,152.10    | 53,892.40                     | 24,682.72                                                    |

*Fuente: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2016)*

### CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

#### SERIES DE TIEMPO Y ESTUDIOS DE FUTURO

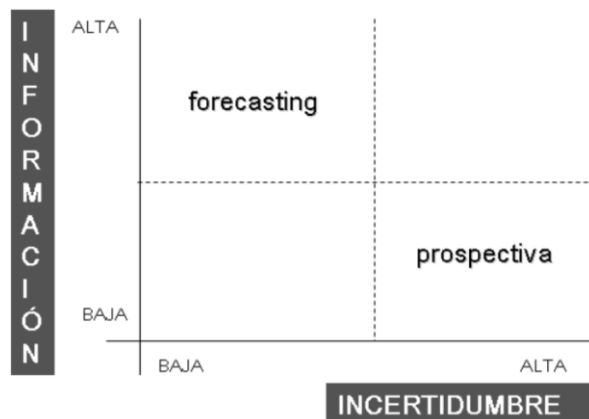
Hernández et. al. (2008) establece que el estudio de las series de tiempo tiene como objetivo principal el desarrollo de modelos estadísticos que permitan explicar el comportamiento de una variable aleatoria que varía con el tiempo, además que sean capaces de estimar pronósticos futuros de dicha variable aleatoria; por lo que es de suma importancia el manejo de las series de tiempo para conocer predicciones de los valores futuros, así como un aporte en los criterios que ayudan a reducir el riesgo en la toma de decisiones o bien, a lograr una implementación exitosa de políticas futuras. Es por esto que son de suma importancia las series de tiempo para el estudio del futuro, ya que, con base a un objetivo en un periodo de tiempo establecido, se puede tomar como referencia datos históricos que nos permitan hacer aproximaciones en el horizonte planeado, anticipándonos y generando las condiciones necesarias para lograr el objetivo, o bien, prepararse para afrontar las adversidades que se pudieran identificar.

Policy Horizons Canada (2018) establece que la prospectiva (foresight) no se encarga de predecir el futuro, sino que busca explorar la gama de futuros plausibles que pudieran surgir, siendo una herramienta para respaldar la formulación de políticas; por otro lado, establece que la predicción (forecasting) es el proceso mediante el cual se pueden realizar pronósticos sobre el futuro, basados en datos históricos y el análisis de tendencias, siendo una herramienta para “predecir” el comportamiento de una variable.

Mojica (2006) establece que, si asociamos al forecasting y a la prospectiva con la situación de incertidumbre que ocasiona el análisis del futuro, podemos constatar una relación inversa entre incertidumbre e información, por lo tanto, a menor información mayor incertidumbre y viceversa, tal como se muestra en la Figura 12.

Tomando en cuenta que este trabajo de investigación se basa en series de tiempo se busca realizar un forecasting a 24 meses ya que la cantidad de datos de las variables que se analizarán corresponden a 165 meses, por lo que el nivel de certidumbre se basará en el horizonte establecido, es decir, entre más parecido sea el número de meses del horizonte propuesto al número de meses que tenemos registro, mayor será la incertidumbre de los resultados.

**FIGURA 12. RELACIÓN DEL FORECASTING Y LA PROSPECTIVA CON LA INFORMACIÓN Y LA INCERTIDUMBRE**



Fuente: Mojica, 2008

**METODOLOGÍA**

La aproximación metodológica con la que se abordará este proyecto de investigación es un método cuantitativo, ya que utiliza valores numéricos para estudiar un fenómeno. En la Tabla 4, encontramos algunas de las ventajas de realizar una investigación a través de un método cuantitativo que Cadena Iñiguez, et. al. (2017) identifican.

**TABLA 4. VENTAJAS DE LOS MÉTODOS CUANTITATIVOS**

|                                                    |                                                                |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>Investigación cuantitativa</b>                  | Basada en la inducción probabilística del positivismo lógico.  |
|                                                    | Medición penetrante y controlada                               |
|                                                    | Objetiva                                                       |
|                                                    | Inferencia más allá de los datos                               |
|                                                    | Confirmatoria, inferencial, deductiva                          |
|                                                    | Orientada al resultado                                         |
|                                                    | Datos “sólidos y repetibles”                                   |
|                                                    | Generalizable                                                  |
|                                                    | Particularista                                                 |
|                                                    | Realidad estática                                              |
|                                                    | Se limita a responder                                          |
|                                                    | Sus hallazgos son generalizables                               |
|                                                    | Siempre plantea hipótesis                                      |
|                                                    | Predicción más fuerte                                          |
|                                                    | La medición es muy precisa                                     |
|                                                    | La interacción del investigador y el sujeto de estudio es baja |
|                                                    | La planeación es precisa                                       |
| Ocupan poco tiempo para su ejecución               |                                                                |
| Interpretación de resultados con mucha objetividad |                                                                |

Fuente: Cadena Iñiguez, et. al. (2017)

Una de las herramientas para el proceso constructivo de un método cuantitativo es el análisis de series de tiempo (misma que será utilizada en este proyecto de investigación), que, así como nos sirven como información general sobre lo que se esté estudiando también nos ayuda a generar un análisis estratégico de la información para el futuro.

Cuando se habla de una serie de tiempo, se trata de un conjunto de datos o valores de una variable que se observan y recopilan en intervalos de tiempo regulares (ya sea diario, semanal, mensual, semestral, anual, etc.).

Para este proyecto de investigación, se emplearán cuatro diferentes métodos de series de tiempo que nos permitirán tener una aproximación más certera de los valores en el horizonte planeado. Las series de tiempo serán analizadas a través de los modelos ARIMA y ETS, así como del método de Autorregresión de Redes Neuronales, los cuales son modelos univariados. Sin embargo, son herramientas de pronóstico que nos permiten tener aproximaciones en el plazo deseado. De igual forma, se empleará un método de Autorregresión Vectorial en R (Vector Autoregression o VAR), ya que es una herramienta de pronóstico multivariante que permite una alternativa simple y flexible al tradicional sistema estructural de ecuaciones, la cual puede ayudar a entender mejor la relación entre series, a diferencia de los modelos de pronóstico univariados estándar (Eloriaga, J., 2020).

## **VARIABLES**

La digestión anaerobia es un proceso biológico que se da en las plantas de tratamiento de aguas residuales, en el que la materia orgánica en ausencia de oxígeno y presencia de bacterias específicas se descompone en biogás; el cual puede ser utilizado como combustible para la generación de energía eléctrica. La temperatura atmosférica impacta en el consumo de agua, ya que entre más cálidas sean las temperaturas, mayor es el consumo; además de que entre la temperatura es un factor importante en el proceso de tratamiento de aguas residuales. Las plantas de tratamiento que se están analizando en este trabajo dependen en su totalidad de la energía eléctrica suministrada por un tercero, por lo que es importante poder predecir la demanda energética que éstas pudieran tener para establecer si con la electricidad que se genere usando el biogás como combustible pudieran ser autosostenibles energéticamente.

La colección de datos cuantitativos que nos ayudaran a conocer el comportamiento de estas variables a lo largo de los años y así poder prospectar cómo influirán en el futuro, generando así situaciones hipotéticas que puedan ayudar a tomar decisiones en el presente. Para la recolección

de datos cuantitativos se realizó a través de consultas en las páginas oficiales de las instituciones seleccionadas, o en su caso, se buscó la opción de obtener la información directamente con instituciones públicas y/o privadas que agreguen valor al proyecto de investigación; con el fin de generar un reporte histórico y con base a tendencias de consumos y crecimiento, hacer una proyección aproximada sobre estas variables en el horizonte de estudio establecido.

En el caso de las variables que estén relacionadas a las plantas de tratamiento de agua residuales se buscó en la dependencia Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey; para las variables relacionadas con la población se hizo la búsqueda en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía; y para las variables que están relacionadas con el medio ambiente se hizo la búsqueda en la Comisión Nacional del Agua. Todos los datos provienen de consulta a fuentes oficiales.

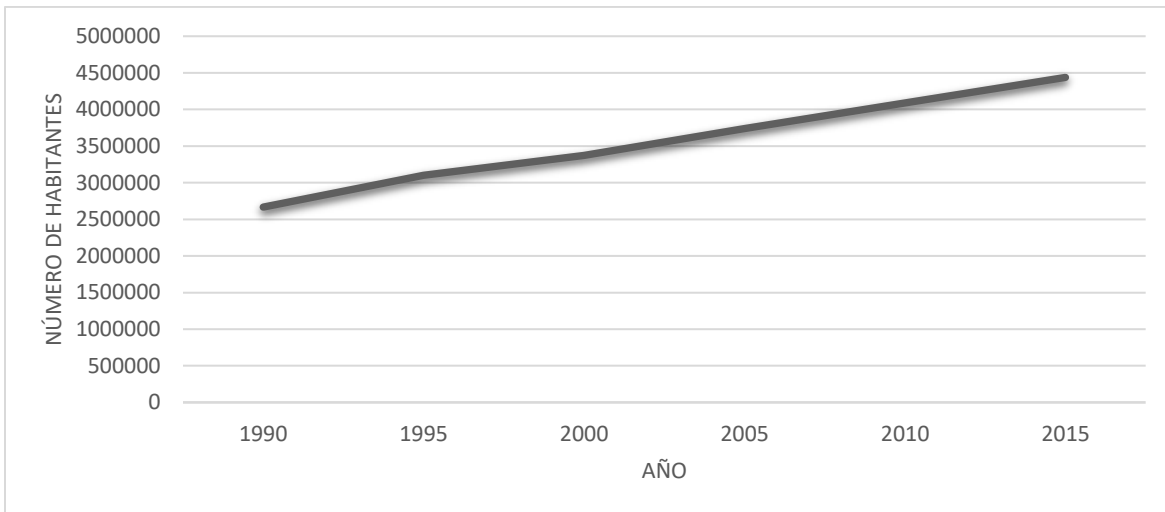
Una vez que son obtenidas las variables se analizarán los datos a un periodo de 24 meses para determinar hasta qué punto las plantas pueden seguir brindando servicio a las aguas tratadas proyectadas, de acuerdo con el crecimiento de la demanda, así como saber que tan autosuficientes resultan en energía.

## **POBLACIÓN**

El crecimiento poblacional o también conocido como crecimiento demográfico es el cambio en la población en un periodo de tiempo. Este crecimiento población trae consigo cambios en las necesidades vitales, entre los que se encuentra una mayor demanda de energía eléctrica, servicio de agua y manejo de residuos. Para fines propios de este proyecto de investigación, se analizará el crecimiento poblacional de la Zona Metropolitana de Monterrey. En la Figura 15 se observa el crecimiento poblacional que ha tenido la Zona Metropolitana de Monterrey según los datos reportados en cada uno de los Censos de Población realizados por el INEGI. Así mismo se observa como la tendencia del crecimiento de la población es al alza, lo cual representará un aumento en la demanda de servicios, entre ellos el agua.



**FIGURA 13. CRECIMIENTO POBLACIONAL EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY.**



*Fuente: Generada con información obtenida de la Secretaría de Economía y Trabajo de Nuevo León, 2020 (<http://datos.nl.gob.mx/n-l-poblacion-total-y-por-municipio/>)*

#### **TEMPERATURA ATMOSFÉRICA**

La variable de la temperatura atmosférica es el grado de calor específico del aire en un lugar y momento determinado. Para el modelo VAR que se propone para este proyecto de investigación se usará el valor de la temperatura media promedio se trata de los promedios estadísticos obtenidos entre las temperaturas máximas y mínimas que se registraron de manera diaria en el mes analizado.

#### **GASTO DE AGUAS RESIDUALES**

Es la cantidad o volumen de aguas residuales que llegan a una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales a través de un conducto y el tiempo que tarda en fluir. Para este proyecto de investigación, será utilizada la cantidad de metros cúbicos de agua que se tratan por mes que es procesada en cada una de las plantas que se analizan.

#### **ENERGÍA ELÉCTRICA**

La energía es la capacidad que tienen los cuerpos para realizar un trabajo y producir cambios en ellos mismos o en otros, en otras palabras, la energía es la capacidad de hacer funcionar las cosas. La operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales basa su funcionamiento en el uso de la energía eléctrica siendo su unidad de medida el kWh. Para esta variable se considerarán los valores de la energía total que se emplea para cada Planta de Tratamiento de manera mensual.

## BIOGÁS

El biogás es un subproducto generado en las plantas de tratamiento y que, al ser metano aproximadamente entre 50% y 70% de su composición, puede ser utilizado como fuente de combustible para la generación de energía eléctrica. Para nuestro proyecto en particular, se calculará la cantidad aproximada de biogás que cada una de las plantas puede estar produciendo de manera mensual.

En la Tabla 5 se muestra la información relevante de las 4 variables que se utilizarán en este proyecto de investigación: biogás, energía eléctrica, agua tratada y temperatura; así como sus unidades de medición, el organismo encargado de recopilar esta información, así como la periodicidad con la que lo hace y el tiempo que tarda en hacer públicos los datos.

Para conocer los datos de cada una de las variables utilizadas para realizar este proyecto de investigación, consultar el apartado de “Anexos”.

**TABLA 5. INFORMACIÓN DE VARIABLES DE ESTUDIO**

|                                                  | <b>Biogás</b>                                   | <b>Energía Eléctrica</b>                        | <b>Agua Tratada</b>                             | <b>Temperatura</b>                   |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Fuente</b>                                    | Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM) | Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM) | Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM) | Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) |
| <b>Periodicidad de medición</b>                  | Mensual                                         | Mensual                                         | Mensual                                         | Mensual                              |
| <b>Tiempo entre la medición y su publicación</b> | Entre 1 y 2 meses                               | Entre 1 y 2 meses                               | Entre 1 y 2 meses                               | Entre 1 y 2 meses                    |
| <b>Unidad de medición de cada variable</b>       | Metros cúbicos por mes (m3/mes)                 | Kilovatio-hora por mes (kWh/mes)                | Metros cúbicos por mes (m3/mes)                 | Grados Celsius (°C)                  |

## **CAPÍTULO IV: APLICACIÓN METODOLÓGICA Y PROCESAMIENTO DE DATOS**

Para la realización de este proyecto de investigación se analizarán primero se analizarán las series de tiempo de las variables que se están estudiando, con el fin de poder identificar patrones, observaciones inusuales, relación entre variables, entre otras, esto se realizará a través del método de descomposición X11

### **DESCOMPOSICIÓN X11**

Los datos de series de tiempo pueden exhibir una variedad de patrones, por lo que este método se utiliza para descomponer los datos mensuales en sus componentes: estacional, tendencia y residuales. A diferencia de la descomposición clásica, en el método x11 las estimaciones del ciclo de tendencia están disponibles para todas las observaciones, incluidos los puntos finales, y el componente estacional puede variar lentamente con el tiempo, en comparación de la descomposición clásica, en el que el componente estacional se mantiene constante, limitando la eficacia de tal descomposición. (Hyndman & Athanasopoulos, 2018)

Los datos desestacionalizados buscan eliminar al máximo la fluctuación que pudiera afectar al ciclo de tendencia de la serie con el fin de que se puedan realizar comparaciones entre meses consecutivos y no consecutivos. El ciclo de tendencia muestra el movimiento general de la serie, ignorando la estacionalidad y cualquier pequeña fluctuación aleatoria.

Una vez analizadas nuestras variables, se analizarán los pronósticos para estas series de tiempo a través 3 métodos diferentes, con el fin de determinar cuál de ellos es el más adecuado para nuestro caso de estudio.

### **MODELO ETS (ERROR, TENDENCIA, ESTACIONAL)**

El modelo ETS es un método de aproximación para pronosticar series de tiempo univariadas, centrándose en los componentes de error, tendencia y estacionales. La flexibilidad del modelo ETS radica en su capacidad de tendencia y componentes estacionales de diferentes rasgos.

Los componentes son los siguientes: La primera letra indica el tipo de error ("A", "M" o "Z"); la segunda letra indica el tipo de tendencia ("N", "A", "M" o "Z"); y la tercera letra indica el tipo de estacionalidad ("N", "A", "M" o "Z"). En todos los casos, "N" = ninguno, "A" = aditivo, "M" = multiplicativo y "Z" = seleccionado automáticamente.

## **MODELO ARIMA**

Los modelos ARIMA son un proceso univariado que proporcionan otro enfoque para el pronóstico de series de tiempo, describiendo las autocorrelaciones en los datos. Estos modelos no se ajustan a los datos constantes ni a los datos que pudieran transformarse en ellos. Los términos autorregresivos (AR) se refieren a los rezagos de las series diferenciadas,  $I$  es el número de diferencia utilizado para hacer estacionaria la serie de tiempo y los términos de media móvil (MA) se refieren a los rezagos de los errores.

La función `auto.arima` de la librería `forecast` de R, proporciona una opción rápida para construir pronósticos con series temporales, debido a que evalúa entre todos los posibles modelos, al mejor modelo considerando diversos criterios: estacionariedad, estacionalidad, diferencias, entre otras. Se puede observar que la función `auto.arima` devuelve el posible mejor modelo de entre todos los modelos y realiza transformaciones de la variable de ser el caso que no sea estacionaria; adicionalmente, evalúa presencia de estacionalidad en la serie y si existe este componente, construye modelos SARIMA.

## **MÉTODO DE AUTORREGRESIÓN VECTORIAL EN R**

Según Eloriaga (2020) el VAR es un modelo lineal multivariante de series de tiempo donde las variables endógenas en el sistema son funciones de los valores rezagados de todas las variables endógenas; dicho de otra manera, el VAR es esencialmente una generalización del modelo autorregresivo univariado. La estimación de un VAR es una ecuación por la ecuación OLS. Lo que se encuentra es que las estimaciones son consistentes ya que solo los valores rezagados de las variables endógenas están en el lado derecho de la ecuación. Además, las estimaciones también son eficientes porque todas las ecuaciones tienen regresores idénticos, lo que minimiza la variación en cada una.

Trujillo (2010) establece los vectores autorregresivos han sido de utilidad para hacer pronósticos en sistemas de variables de series de tiempo interrelacionadas, donde las variables se ayudan entre sí para pronosticar a las demás. Así mismo también menciona que la evaluación de políticas está directamente relacionada con la predicción asumiendo que la elección de políticas es cuantitativa, explícita e inequívoca. De hecho, la predicción y la evaluación de políticas están interrelacionadas dentro de un sistema de retroalimentación, de tal manera que la evaluación de políticas debe estar fundamentada con base en predicciones de los efectos de las distintas políticas alternativas.

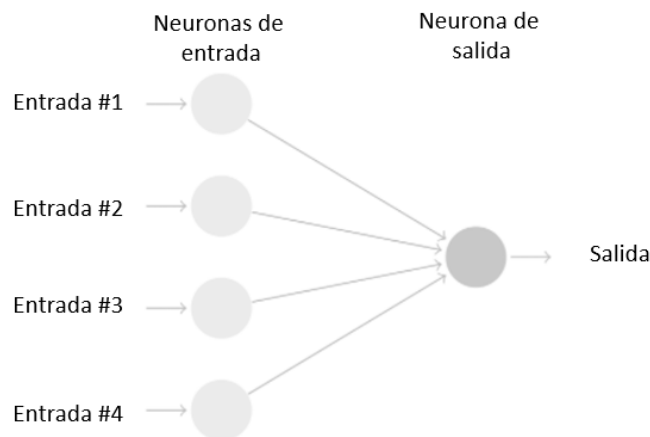
## MÉTODO DE REDES NEURONALES

Las redes neuronales artificiales son un método de pronóstico que se basan en modelos matemáticos simples del cerebro en los que se permiten realizar relaciones complejas no lineales entre la variable de respuesta y sus predictores. Estas redes neuronales están organizadas en capas entre las que se encuentran: las neuronas predictoras o de entrada que conforman la capa inferior; las neuronas de pronósticos o de salida que conforman la capa superior; y pueden contener neuronas ocultas que conforman las capas intermedias.

Cuando las redes neuronales no contienen capas ocultas, significa que son equivalentes a regresiones lineales, por lo que al contenerlas la red se estaría convirtiendo en no lineal.

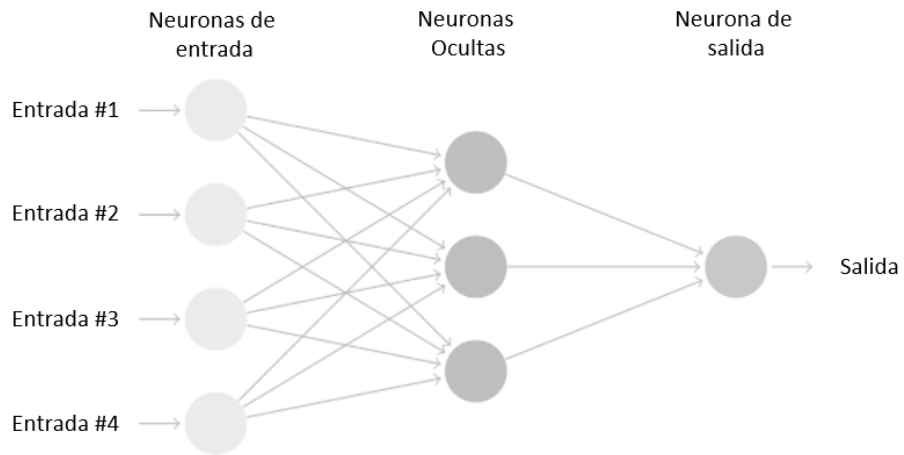
En la Figura 14 se muestra una red neuronal lineal donde se observan cuatro neuronas de entrada, las cuales tienen una ponderación sobre la neurona de salida que se calcula mediante un algoritmo de aprendizaje.

**FIGURA 14. RED NEURONAL LINEAL**



En la Figura 15 se muestra una red neuronal no lineal, también conocida como red de alimentación directa multicapa, esta red también se calcula mediante un algoritmo de aprendizaje, en donde cada una de las neuronas ocultas reciben entradas de las capas anteriores (pueden existir más de una capa intermedia), por lo que la salida de una capa es la entrada para la(s) capa(s) sucesivas.

**FIGURA 15. RED NEURONAL NO LINEAL**



**AUTORREGRESIÓN DE LA RED NEURONAL.**

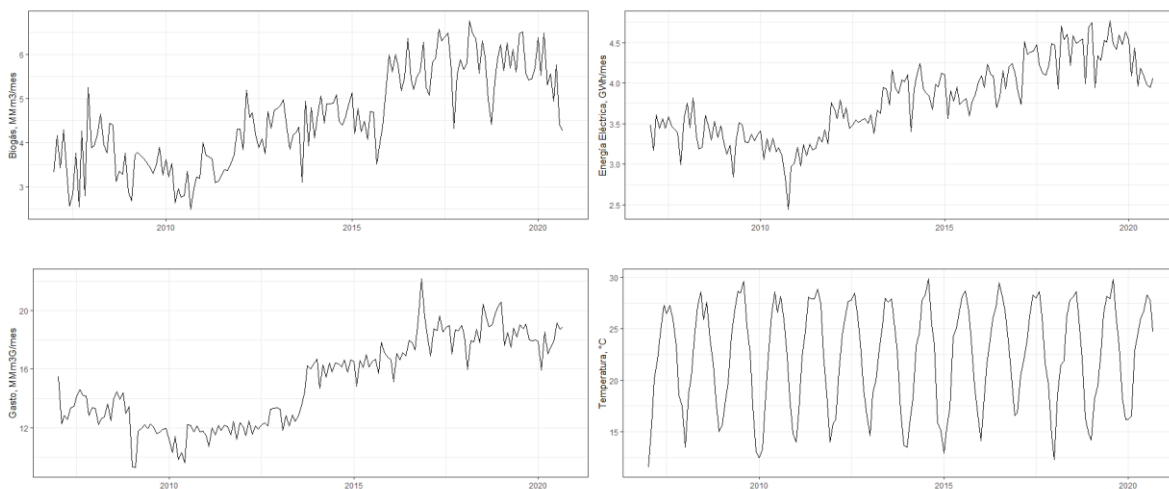
Con los datos de las series de tiempo, los valores rezagados de la serie de tiempo se pueden usar como entradas a una red neuronal, tal como se realiza en un modelo de autorregresión lineal, teniendo así un modelo de autorregresión de red neuronal o modelo NNAR. El objetivo es entonces determinar cuántos rezagos incluir en la capa de entrada y cuántas neuronas incluir en la capa oculta para producir un pronóstico que minimice el RMSE.

## CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y RESULTADOS

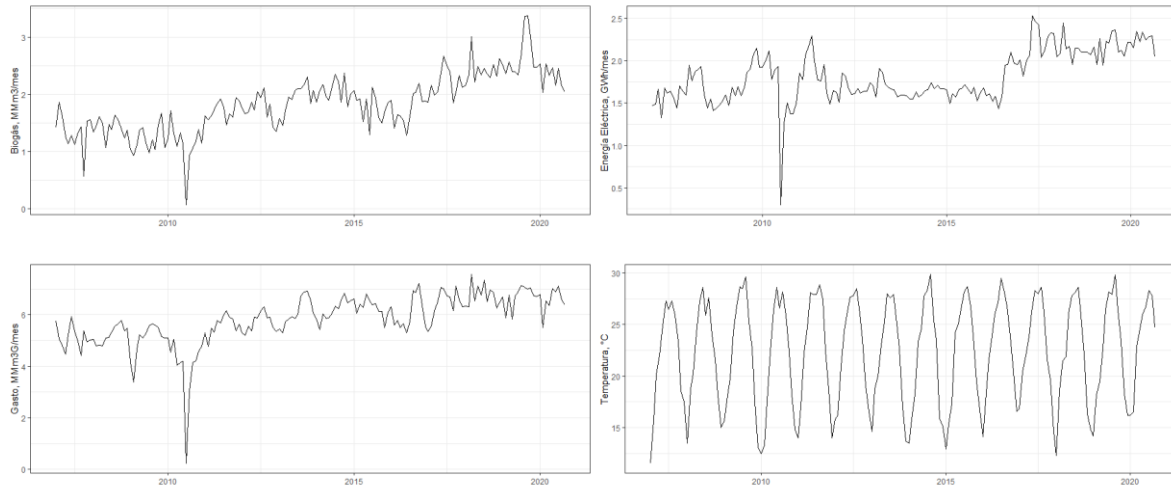
Para comenzar con el análisis de las series de tiempo de las variables con las que se va a estar trabajando, éstas fueron graficadas con el objetivo de visualizar características de los datos, entre los que se encuentran patrones, observaciones inusuales, cambios a lo largo del tiempo, relaciones entre las variables.

En la Figura 16 y la Figura 17 se observa como las mediciones de las variables de biogás producido, energía eléctrica utilizada, y cantidad de agua tratada, han ido creciendo, siendo la planta “Dulces Nombres” la que ha experimentado un mayor incremento. También se pueden identificar observaciones inusuales en la planta “Norte” en el año 2010 las mediciones de las variables de biogás producido, energía eléctrica utilizada, y cantidad de agua tratada tuvieron un decremento significativo en una de sus mediciones. Para la variable de la temperatura, en ambas plantas las mediciones de la temperatura son las mismas ya que las dos se encuentran en el estado de Nuevo León, sin embargo, podemos identificar que esta serie es estacionaria, ya que se observa un mismo comportamiento a lo largo de los años, pudiendo identificarse como las crestas corresponden a los meses más calurosos y los valles a los meses más fríos.

**FIGURA 16. SERIES DE CADA VARIABLE DE ESTUDIO PARA LA PLANTA “DULCES NOMBRES”**



**FIGURA 17. SERIES DE CADA VARIABLE DE ESTUDIO PARA LA PLANTA “NORTE”**



### **DESCOMPOSICIÓN X11**

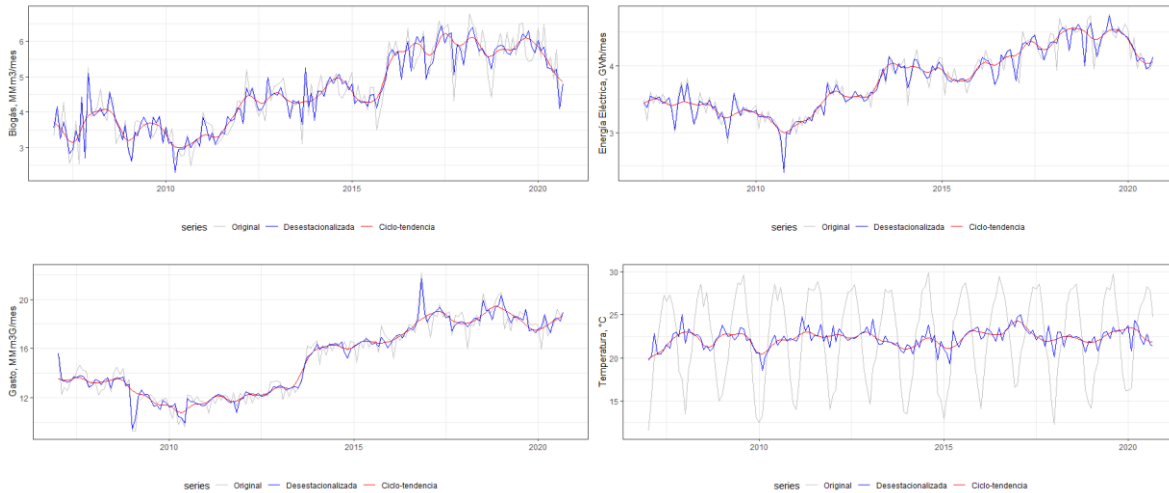
La estacionalidad son los patrones de comportamiento que muestran las variables en momentos específicos del año, por lo que las convierte en variables predecibles y a su vez facilita su estudio temporal, por lo que es importante desestacionalizar las series de datos con el fin de ajustar y remover de éstas los efectos del componente estacional con el objetivo de analizar la tendencia de variables.

Al aplicar el método de descomposición x11 a nuestras series de tiempo, podemos observar en la Figura 18 y Figura 19 las series de tiempo correspondientes a las plantas “Dulces Nombres” y “Norte”, siendo las líneas en color gris los datos originales de las variables, las líneas azules los datos desestacionalizados y las líneas rojas los ciclos de tendencia.

En la Figura 18 se muestran las series de tiempo correspondientes a la planta “Dulces Nombres”, donde para las variables del biogás, energía eléctrica y cantidad de agua tratada se observa como la serie desestacionalizada es muy parecida a la serie original ya que no cuentan con una estacionalidad climática, así como la tendencia de valores es de crecimiento; por otro lado, para la temperatura se puede ver como si existe una diferencia entre la serie original y la desestacionalizada, ya que la temperatura si está relacionada con la estacionalidad climática, además de que la tendencia indica que los valores presentan poco incremento a lo largo del tiempo.

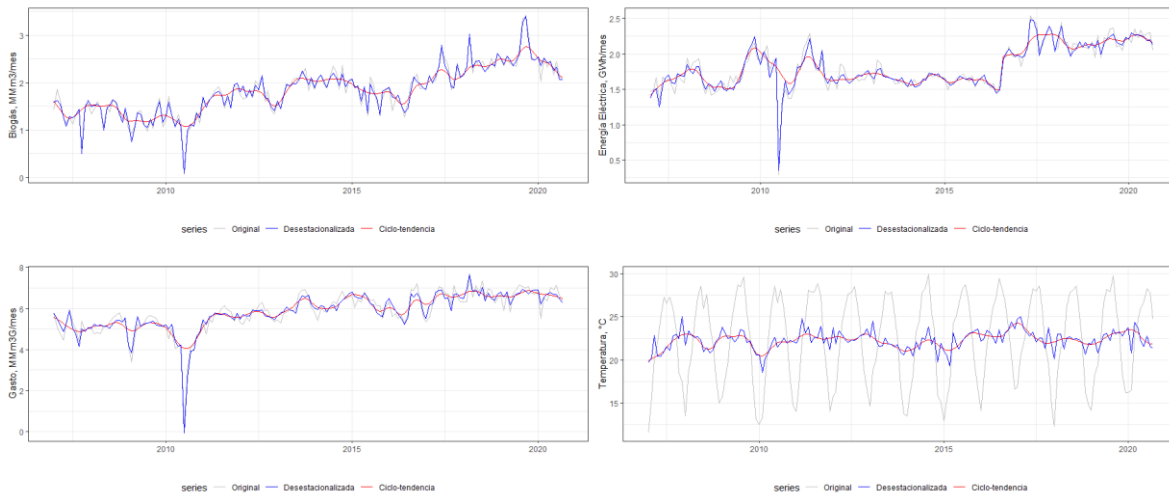


**FIGURA 18. DESCOMPOSICIÓN X11 DE LOS DATOS DE LA PLANTA “DULCES NOMBRES”.**



En la Figura 19 se muestran las series de tiempo correspondientes a la planta “Norte”, las cuales son muy parecidas al caso de la planta “Dulces Nombres”, ya que la serie original y la desestacionalizada de las variables del biogás, energía eléctrica y cantidad de agua tratada son muy similares por no contar con la estacionalidad climática, así como un ciclo de tendencia de crecimiento en los valores de estas variables. valores es de crecimiento.

**FIGURA 19. DESCOMPOSICIÓN X11 DE LOS DATOS DE LA PLANTA “NORTE”.**



Una vez realizado este análisis de las variables de estudio de las dos plantas de tratamiento de agua, vemos que el crecimiento en el consumo de energía eléctrica de las plantas de tratamiento se está viendo afectado por el incremento en la cantidad de agua residual que tiene que ser procesada en cada una de las plantas, esto como resultado del incremento del crecimiento poblacional que la

Zona Metropolitana de Monterrey ha experimentado en los últimos años y que trae consigo una mayor demanda de agua.

### **MÉTODO ETS (ERROR, TENDENCIA, ESTACIONAL)**

El modelo ETS es un método de aproximación para pronosticar series de tiempo univariadas, centrándose en los componentes de error (aditivo o multiplicativo), tendencia (aditiva o multiplicativa) y estacionalidad (aditiva o multiplicativa).

En la Figura 20 y Figura 21 podemos ver el resultado del método de pronóstico ETS para cada una de las variables que se están analizando de las plantas “Dulces Nombres” y “Norte”. La línea gris corresponde a los datos originales, la línea roja corresponde a los datos pronosticados por método de estimación y la línea azul corresponde al pronóstico de los siguientes 24 meses, el cual es el horizonte al que se está desarrollando este proyecto. La zona sombreada de azul oscuro corresponde a un intervalo de confianza del 80% y la zona sombreada de azul claro corresponde a uno de 95%.

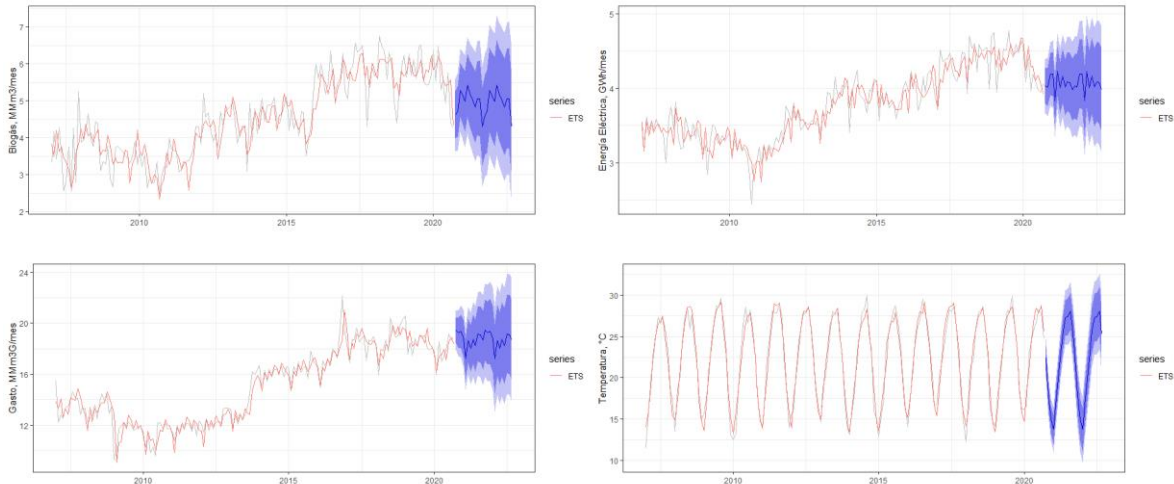
En la Figura 20 se puede observar que el pronóstico de la cantidad de biogás producido y la cantidad de energía eléctrica para la planta “Dulces Nombres”, mantiene un pronóstico con tendencia de decrecimiento respecto a los valores de la serie original, sin embargo, se observa cómo que la cantidad de agua tratada si tiene fluctuaciones, pero el pronóstico indica que la tendencia se mantiene similar a los datos anteriores. Para la variable de la temperatura el pronóstico sigue el mismo ciclo de tendencia que se observa a lo largo de la serie de tiempo. Esto pudiera indicar que la cantidad de agua a tratar seguirá siendo la misma, con una disminución en la cantidad de biogás producido, pero a la vez también se presentaría un menor consumo de energía eléctrica para la operación de la planta (Ver resultados complementarios en “Anexo 11. Resultados Método ETS”).

Para esta planta el modelo arroja para cada una de las variables los siguientes residuales de ETS:

- Biogás: ETS (A,N,A) (Modelo con errores aditivos, sin tendencia y estacionalidad aditiva)
- Energía Eléctrica: ETS (A,N,A) (Modelo con errores aditivos, sin tendencia y estacionalidad aditiva)
- Cantidad de agua tratada: ETS (A,N,A) (Modelo con errores aditivos, sin tendencia y estacionalidad aditiva)

- Temperatura: ETS (A,N,A) (Modelo con errores aditivos, sin tendencia y estacionalidad aditiva)

**FIGURA 20. MÉTODO DE PRONÓSTICO ETS PARA PLANTA “DULCES NOMBRES”.**

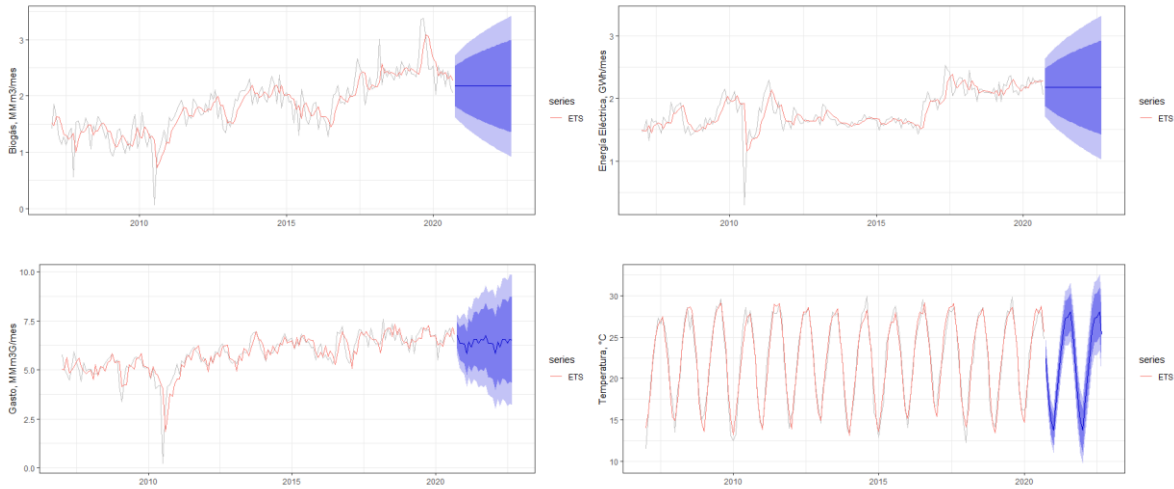


En la Figura 21 se puede observar que el pronóstico de la cantidad de biogás producido, la cantidad de energía eléctrica para la planta “Norte”, mantiene un pronóstico con tendencia horizontal, es decir, sin aumento ni decremento, sin embargo, se observa cómo que la cantidad de agua tratada si tiene fluctuaciones, pero, el pronóstico indica que la tendencia se mantiene similar a los datos anteriores. Para la variable de la temperatura el pronóstico sigue el mismo ciclo de tendencia que se observa a lo largo de la serie de tiempo. Esto pudiera indicar que la planta va a estar funcionando de una manera similar a la actualidad por los próximos 24 meses (Ver resultados complementarios en “Anexo 11. Resultados Método ETS”).

Para esta planta el modelo arroja para cada una de las variables los siguientes residuales de ETS:

- Biogás: ETS (A,N,N) (Modelo con errores aditivos, sin tendencia ni estacionalidad)
- Energía Eléctrica: ETS (M,N,N) (Modelo con errores multiplicativos, sin tendencia ni estacionalidad)
- Cantidad de agua tratada: ETS (A,N,A) (Modelo con errores aditivos, sin tendencia y estacionalidad aditiva)
- Temperatura: ARIMA ETS (A,N,A) (Modelo con errores aditivos, sin tendencia y estacionalidad aditiva)

**FIGURA 21. MÉTODO DE PRONÓSTICO ETS PARA PLANTA “NORTE”**



Según la prueba Ljung-Box podemos ver como los valores son menores a 0.05, por lo cual no se rechaza la hipótesis nula y nos indica que la serie si tiene autocorrelación, lo cual pudiera hacer que valores pronóstico no tuvieran gran asertividad. Por lo tanto, se descarta este método.

### **MÉTODO AUTO.ARIMA**

En la Figura 22 y Figura 23 podemos ver el resultado del método de pronóstico AUTO.ARIMA para cada una de las variables que se están analizando de las plantas “Dulces Nombres” y “Norte”. La línea gris corresponde a los datos originales, la línea roja corresponde a los datos pronosticados por método de estimación y la línea azul corresponde al pronóstico de los siguientes 24 meses, el cual es el horizonte al que se está desarrollando este proyecto. La zona sombreada de azul oscuro corresponde a un intervalo de confianza del 80% y la zona sombreada de azul claro corresponde a uno de 95%.

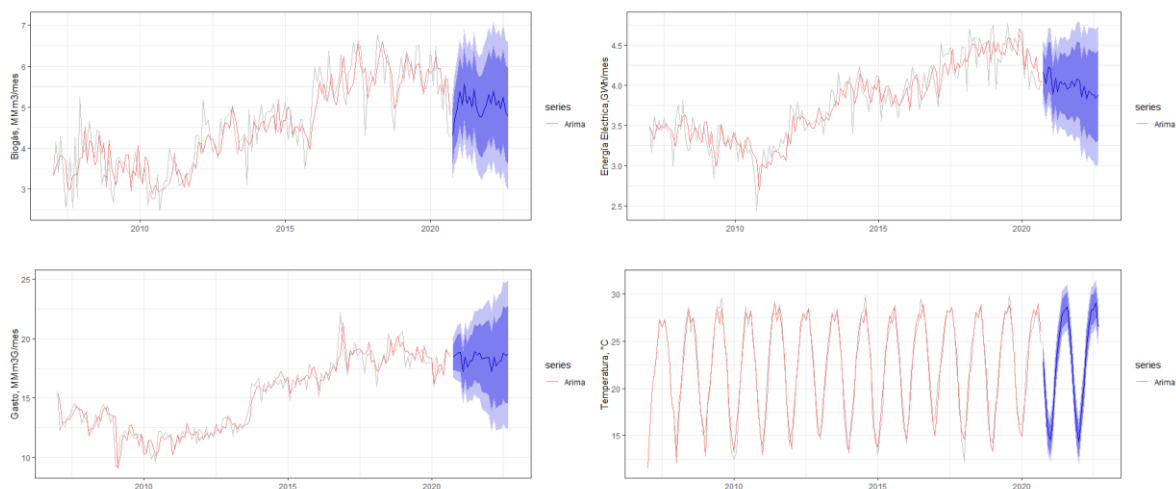
En la Figura 22 se puede observar que el pronóstico de la cantidad de biogás producido, la cantidad de agua tratada para la planta “Dulces Nombres”, mantiene un pronóstico similar a los últimos datos, mientras que la cantidad de energía eléctrica mantiene un pronóstico de decrecimiento. Se observa que para la variable de la temperatura el pronóstico sigue el mismo ciclo de tendencia que se observa ha observado en los métodos anteriores. Esto pudiera indicar que la cantidad de agua a tratar seguirá siendo la misma, con una ligera disminución en la cantidad de biogás producido, pero a la vez también se presentaría un decremento constante en el consumo de energía eléctrica para

la operación de la planta (Ver resultados complementarios en “Anexo 12. Resultados Método ARIMA”).

Para esta planta el mejor modelo de arima arrojado por el programa para cada una de las variables fue:

- Biogás: ARIMA (2,1,2) (2,0,0)
- Energía Eléctrica: ARIMA (1,1,1) (2,0,0)
- Cantidad de agua tratada: ARIMA (3,1,0) (2,0,0)
- Temperatura: ARIMA (1,0,1) (2,1,2)

**FIGURA 22. MÉTODO DE PRONÓSTICO ARIMA PARA PLANTA “DULCES NOMBRES”**



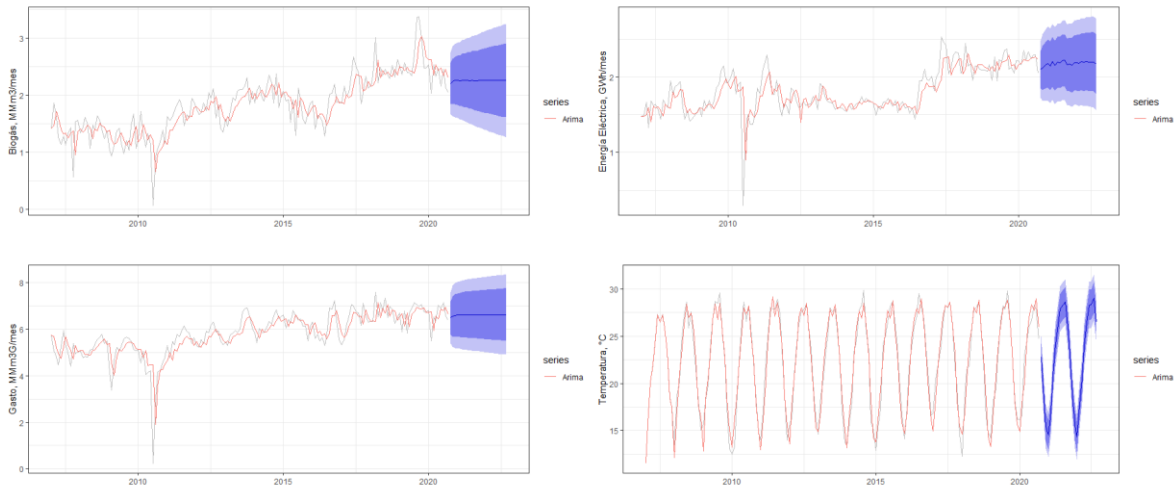
En la Figura 23 se puede observar que el pronóstico de la cantidad de biogás producido y la cantidad de agua tratada para la planta “Norte”, tiene un pronóstico horizontal, mientras que la cantidad de energía eléctrica tiene un pequeño crecimiento. Estos pronósticos pudieran presentar esa tendencia debido a que las series de tiempo no han tenido un crecimiento tan acelerado como en el caso de la Planta “Dulces Nombres”. Se observa que para la variable de la temperatura el pronóstico sigue el mismo ciclo de tendencia que se observa ha observado en los métodos anteriores. Esto pudiera indicar que la planta va a estar funcionando de una manera similar a la actualidad por los próximos 24 meses (Ver resultados complementarios en “Anexo 12. Resultados Método ARIMA”).

Para esta planta el mejor modelo de arima arrojado por el programa para cada una de las variables fue:

- Biogás: ARIMA (1,1,1) (1,0,0)

- Energía Eléctrica: ARIMA (1,1,1) (0,0,2)
- Cantidad de agua tratada: ARIMA (1,1,1)
- Temperatura: ARIMA (1,0,1) (2,1,2)

**FIGURA 23. MÉTODO DE PRONÓSTICO ARIMA PARA PLANTA “NORTE”**



### AUTORREGRESIÓN DE LAS REDES NEURONALES

En la Figura 24 y Figura 25 podemos ver el resultado del método de pronóstico mediante la autorregresión de la red neuronal para cada una de las variables que se están analizando de las plantas “Dulces Nombres” y “Norte”. La línea gris corresponde a los datos originales, la línea roja corresponde a los datos pronosticados por método de estimación y la línea azul corresponde al pronóstico de los siguientes 24 meses, el cual es el horizonte al que se está desarrollando este proyecto. La zona sombreada de azul oscuro corresponde a un intervalo de confianza del 80% y la zona sombreada de azul claro corresponde a uno de 95%.

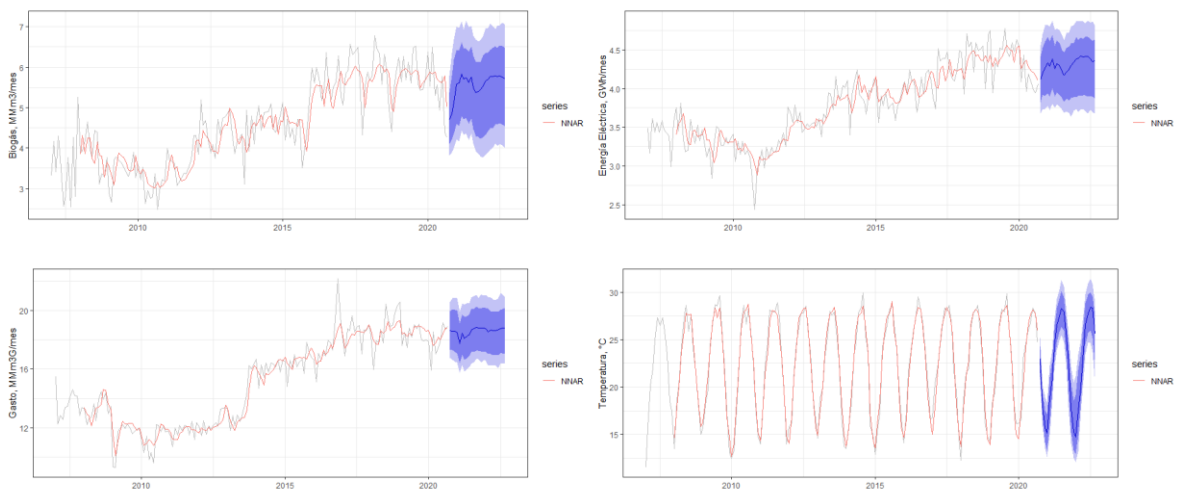
En la Figura 24 se puede observar que el pronóstico de la cantidad de biogás producido, la energía eléctrica consumida y la cantidad de agua tratada por la planta “Dulces Nombres”, tiene un pronóstico de crecimiento haciendo la comparación con los datos originales. Respecto a los valores del método de autorregresión de la red neuronal, se puede visualizar que la tendencia del pronóstico es parecida a los últimos años reportados. Se observa que para la variable de la temperatura el pronóstico sigue el mismo ciclo de tendencia que se observa ha observado en los métodos anteriores. Esto pudiera indicar que la cantidad de agua a tratar seguirá siendo la misma, con una ligera disminución en la cantidad de biogás producido, pero a la vez también se presentaría

un decremento constante en el consumo de energía eléctrica para la operación de la planta. (Ver resultados complementarios en “Anexo 13. Resultados Modelo Autorregresión De Las Redes Neuronales”)

Para esta planta el método NNAR determinó los siguientes parámetros:

- Biogás: 4 últimas observaciones y 3 neuronas en la capa oculta.
- Energía Eléctrica: 3 últimas observaciones y 2 neuronas en la capa oculta.
- Cantidad de agua tratada: 3 últimas observaciones y 2 neuronas en la capa oculta.
- Temperatura: 5 últimas observaciones y 4 neuronas en la capa oculta.

**FIGURA 24. MÉTODO DE PRONÓSTICO AUTORREGRESIÓN DE LA RED NEURONAL PARA PLANTA “DULCES NOMBRES”**

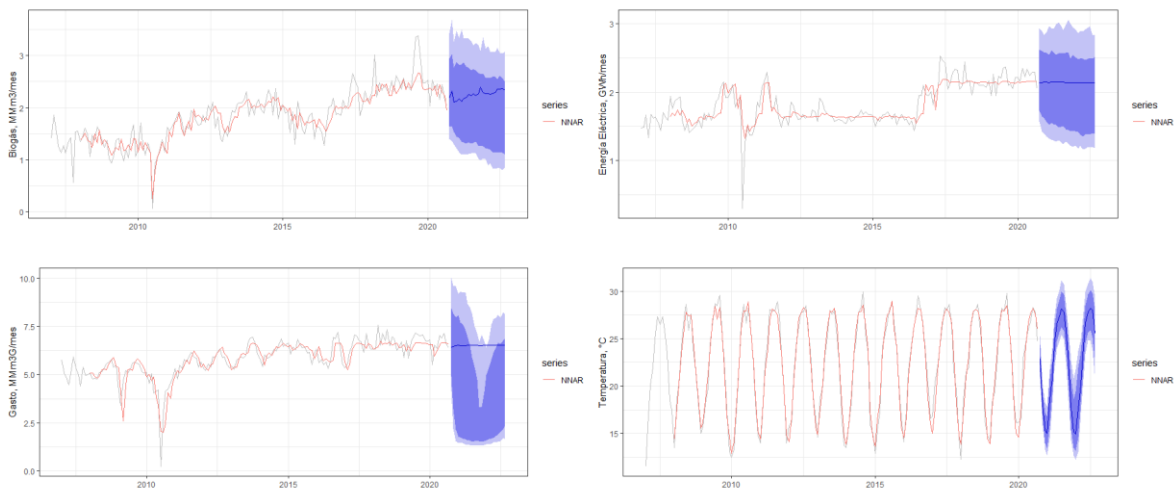


En la Figura 25 se puede observar que el pronóstico de la cantidad de biogás producido en la planta “Norte”, tiene un pequeño pronóstico de crecimiento haciendo la comparación con los datos originales; para las variables de la energía eléctrica consumida y la cantidad de agua tratada, se observa que el pronóstico se mantiene con una tendencia prácticamente horizontal, no existe ni un crecimiento ni disminución de estas variables. Respecto a los valores del método de red neuronal, se puede visualizar que la tendencia del pronóstico también tiene un comportamiento similar a los últimos años reportados. Esto pudiera indicar que la planta va a estar funcionando de una manera similar a la actualidad por los próximos 24 meses (Ver resultados complementarios en “Anexo 13. Resultados Modelo Autorregresión De Las Redes Neuronales”).

Para esta planta el método NNAR determinó los siguientes parámetros:

- Biogás: 4 últimas observaciones y 3 neuronas en la capa oculta.
- Energía Eléctrica: 3 últimas observaciones y 2 neuronas en la capa oculta.
- Cantidad de agua tratada: 3 últimas observaciones y 2 neuronas en la capa oculta.
- Temperatura: 5 últimas observaciones y 4 neuronas en la capa oculta.

**FIGURA 25. MÉTODO DE PRONÓSTICO AUTORREGRESIÓN DE LA RED NEURONAL PARA PLANTA “NORTE”**



## MODELOS DINÁMICOS

Los modelos dinámicos son modelos bivariados que nos permiten identificar si existe cierta relación entre 2 variables de estudio. Este modelo está basado en la regresión con errores ARIMA, el cual es calculado mediante la función AUTO.ARIMA ajustando el modelo con el argumento xreg, el cual será la variable contra la que queremos relacionarla.

## PLANTA “DULCES NOMBRES”

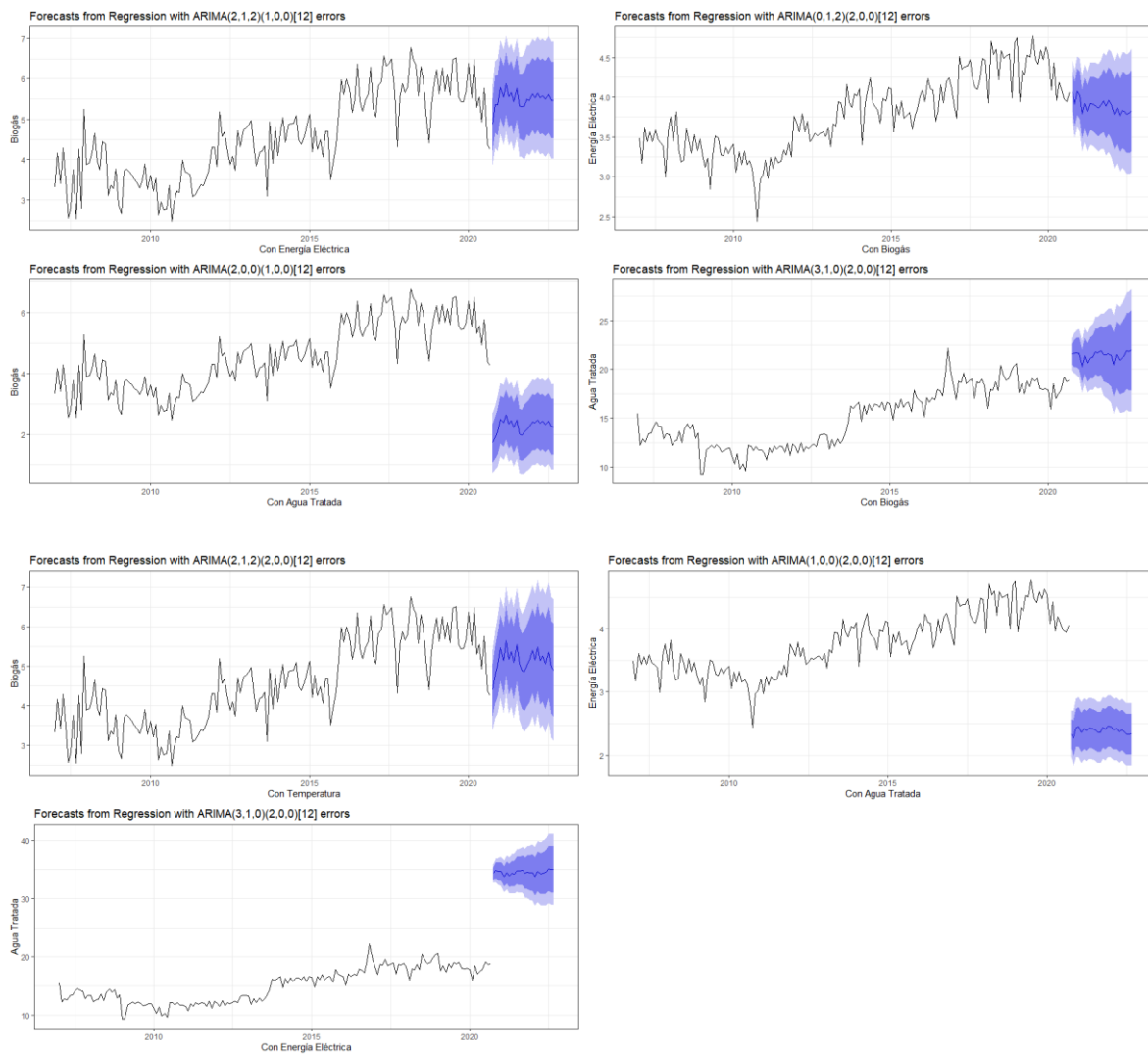
En la Figura 26 se muestran los pronósticos para cada uno de los modelos propuestos para la planta “Dulces Nombres”; entre lo que se puede observar:

- La generación de biogás si tiene relación con la energía eléctrica consumida ya que el pronóstico es ascendente, en cambio esta última no tiene relación con el biogás ya que el pronóstico es descendente.



- La generación de biogás no tiene relación con el agua tratada ya que el pronóstico es descendente, en cambio esta última si tiene relación con la generación de biogás ya que el pronóstico es ascendente.
- La energía eléctrica consumida no tiene relación con el agua tratada ya que el pronóstico es descendente, en cambio esta última si tiene relación con la energía consumida ya que el pronóstico es ascendente
- La generación de biogás si tiene relación con la temperatura ya que el pronóstico es ascendente.

**FIGURA 26. MODELOS DINÁMICOS PARA PLANTA “DULCES NOMBRES”**



Los resultados obtenidos de la regresión con errores ARIMA son:

- Biogás con Energía Eléctrica: Regresión with ARIMA (2,1,2)(1,0,0)[12] errors
- Energía Eléctrica con Biogás: Regresión with ARIMA (0,1,2)(2,0,0)[12] errors
- Biogás con Agua Tratada: Regresión with ARIMA (2,0,0)(1,0,0)[12] errors
- Agua Tratada con Biogás: Regresión with ARIMA (3,1,0)(2,0,0)[12] errors
- Biogás con Temperatura: Regresión with ARIMA (2,1,2)(2,0,0) [12] errors
- Energía Eléctrica con Agua Tratada: Regresión with ARIMA (1,0,0)(2,0,0) [12] errors
- Agua tratada con Energía eléctrica: Regresión with ARIMA (3,1,0)(2,0,0) [12] errors

Ver resultados complementarios en “Anexo 14. Resultados Modelos Dinamicos”.

### **PLANTA “NORTE”**

En la Figura 27 se muestran los pronósticos para cada uno de los modelos propuestos para la planta “Norte”; entre lo que se puede observar:

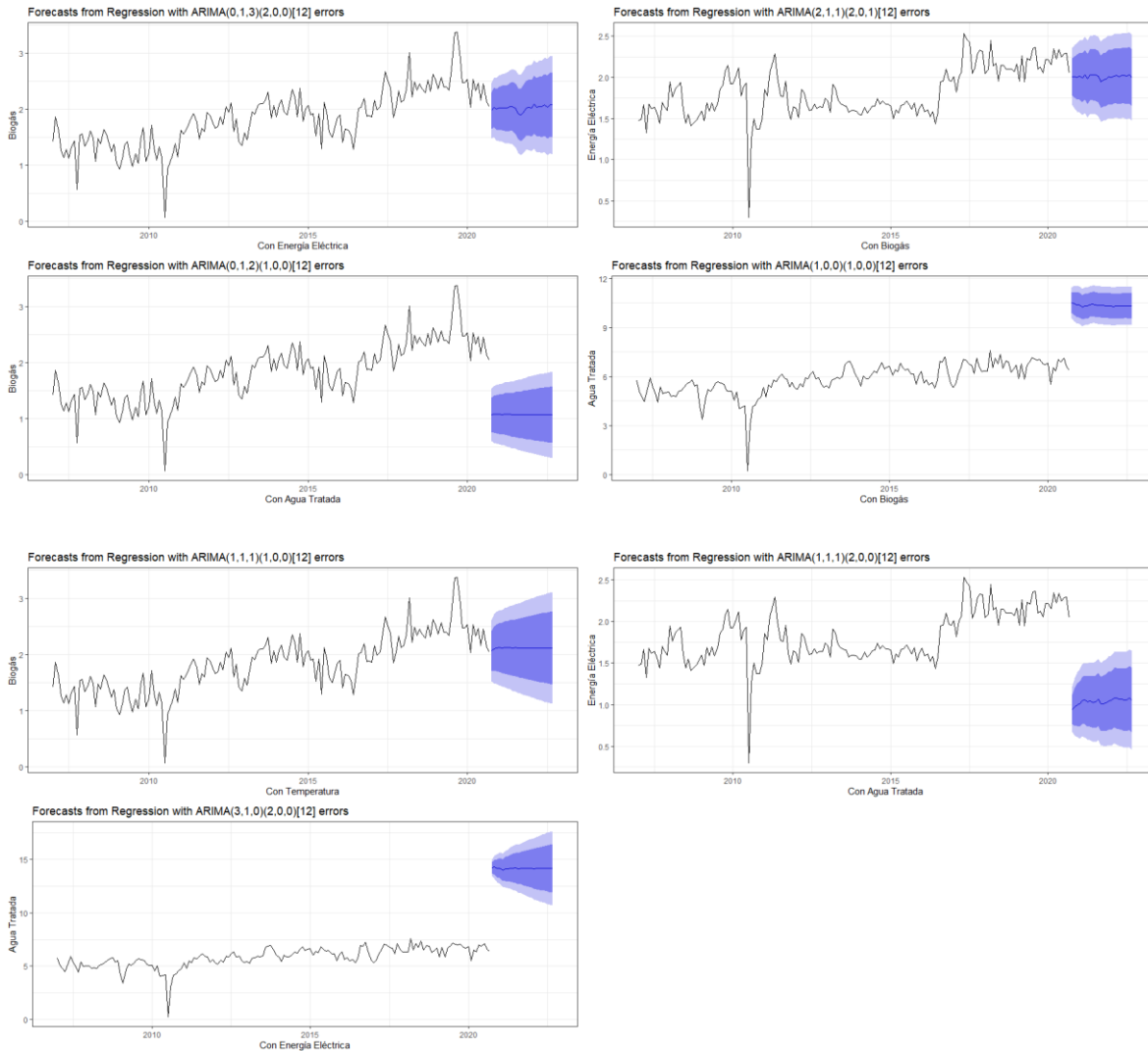
- La generación de biogás si tiene relación con la energía eléctrica consumida ya que el pronóstico es horizontal, sin tendencia ascendente ni descendente, al igual que la energía consumida tiene relación con la generación del biogás
- La generación de biogás no tiene relación con el agua tratada ya que el pronóstico es descendente, en cambio esta última si tiene relación con la generación de biogás ya que el pronóstico es ascendente.
- La energía eléctrica consumida no tiene relación con el agua tratada ya que el pronóstico es descendente, en cambio esta última si tiene relación con la energía consumida ya que el pronóstico es ascendente
- La generación de biogás si tiene relación con la temperatura ya que el pronóstico se mantiene horizontal

Los resultados obtenidos de la regresión con errores ARIMA son:

- Biogás con Energía Eléctrica: Regresión with ARIMA (2,1,2)(1,0,0)[12] errors
- Energía Eléctrica con Biogás: Regresión with ARIMA (0,1,2)(2,0,0)[12] errors
- Biogás con Agua Tratada: Regresión with ARIMA (2,0,0)(1,0,0)[12] errors
- Agua Tratada con Biogás: Regresión with ARIMA (3,1,0)(2,0,0)[12] errors
- Biogás con Temperatura: Regresión with ARIMA (2,1,2)(2,0,0) [12] errors

- Energía Eléctrica con Agua Tratada: Regresión with ARIMA (1,0,0)(2,0,0) [12] errors
- Agua tratada con Energía eléctrica: Regresión with ARIMA (3,1,0)(2,0,0) [12] errors

**FIGURA 27. MODELOS DINÁMICOS PARA PLANTA “NORTE”**



Ver resultados complementarios en “Anexo 14. Resultados Modelos Dinamicos”.

## MÉTODO DE AUTORREGRESIÓN VECTORIAL EN R

### PLANTA “DULCES NOMBRES”

Para poder llevar a cabo el método de autorregresión vectorial, es necesario que las series sean estacionarias, sin embargo, al realizar la prueba Dickey-Fuller se determinó que las series no eran estacionarias, por lo que se aplicó una diferenciación y se ejecutó de nuevo la prueba teniendo como resultado la estacionariedad de las series. Para determinar qué efectos tenían ciertas variables en

otras, se ejecutó la simulación “Impulse Response Functions” (IRF) obteniendo que el biogás se afecta tanto a sí mismo como al consumo de la energía eléctrica, la energía eléctrica afecta a la producción de biogás, el agua tratada afecta a la producción de biogás y la temperatura afecta a la producción de biogás.

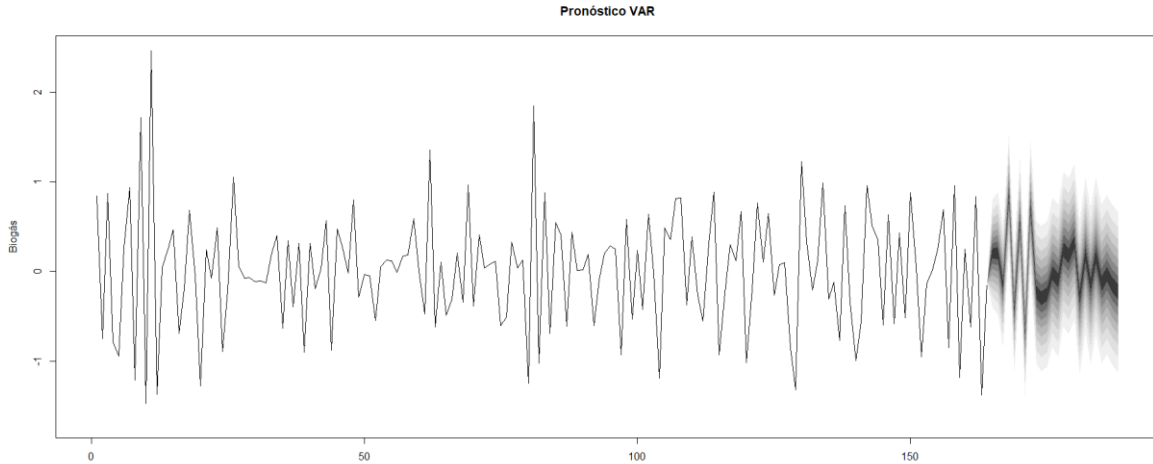
Con el fin de visualizar en qué medida las variables afectan a las demás se empleó la simulación “Forecast Error Variance Decomposition” la cual nos permitió identificar impactos como:

- Donde para el mes 1 el 100% es biogás vs biogás.
- Para el mes 6 el 96.4% es biogás, el 2.1% es energía eléctrica, el 1% es agua tratada y el .5% es temperatura
- Para el mes 12 el 82% es biogás, el 8% es energía eléctrica, el 3% es agua tratada y el 7% es temperatura
- Para el mes 18 el 79% es biogás, el 9% es energía eléctrica, el 4% es agua tratada y el 8% es temperatura
- Para el mes 24 el 77% es biogás, el 9% es energía eléctrica, el 4% es agua tratada y el 10% es temperatura

La importancia del método de autorregresión vectorial permite la evaluación de política fundamentadas con base en predicciones de los efectos de las distintas políticas alternativas, por lo que el forecast error variance decomposition es de suma importancia ya que, según Trujillo (2010) con éste se pueden calcular las contribuciones de las innovaciones sobre el error de predicción del siguiente periodo. Es por esto que en un principio el biogás solamente se afecta a sí mismo, y con el transcurso de los periodos, las demás variables van incrementado su impacto en la generación de biogás.

Para finalizar se realiza un pronóstico del biogás mediante el modelo de autorregresión vectorial y se obtuvo que el comportamiento del biogás se va a mantener constante a los valores proyectados en los periodos pasados, esto en el horizonte de 24 meses con una certidumbre del 95%, lo cual se puede observar en la Figura 28. (Ver resultados complementarios en “Anexo 15. Resultados De Modelo De Autorregresión Vectorial”)

**FIGURA 28. FORECAST VAR PARA BIOGÁS**



### **PLANTA "NORTE"**

Para poder llevar a cabo el método de autorregresión vectorial, es necesario que las series sean estacionarias, sin embargo, al realizar la prueba Dickey-Fuller se determinó que las series no eran estacionarias, por lo que se aplicó una diferenciación y se ejecutó de nuevo la prueba teniendo como resultado la estacionariedad de las series. Para determinar qué efectos tenían ciertas variables en otras, se ejecutó la simulación "Impulse Response Functions" (IRF) obteniendo que el biogás se afecta tanto a sí mismo como al consumo de la energía eléctrica, la energía eléctrica afecta a la producción de biogás, el agua tratada afecta a la producción de biogás y la temperatura afecta a la producción de biogás.

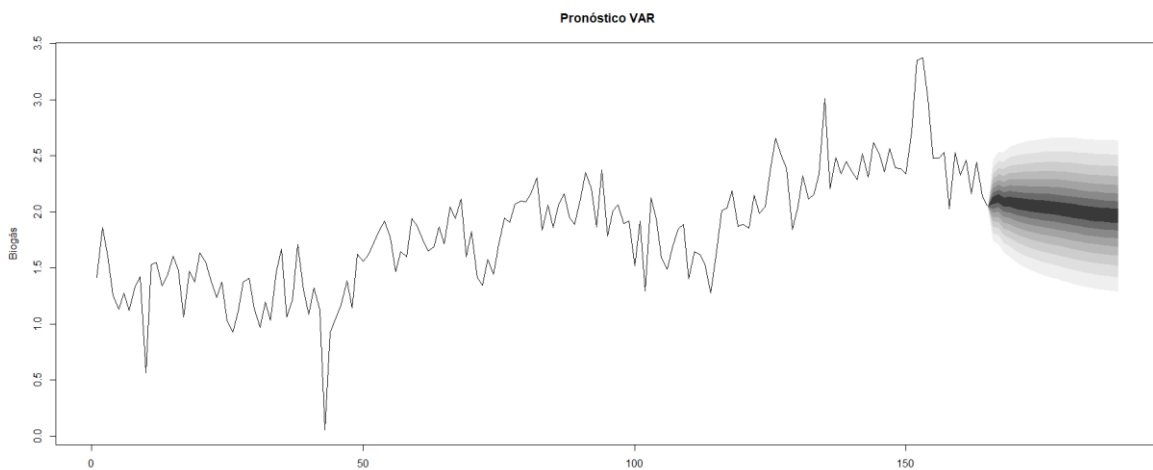
Con el fin de visualizar en qué medida las variables afectan a las demás se empleó la simulación "Forecast Error Variance Decomposition" la cual nos permitió identificar impactos como:

- Donde para el mes 1 el 100% es biogás vs biogás.
- Para el mes 6 el 96% es biogás, el 1.8% es energía eléctrica, el 2% es agua tratada y el .2% es temperatura
- Para el mes 12 el 94.6% es biogás, el 3.6% es energía eléctrica, el 1.6% es agua tratada y el 0.2% es temperatura
- Para el mes 18 el 93.2% es biogás, el 5.2% es energía eléctrica, el 1.5% es agua tratada y el 0.1% es temperatura

- Para el mes 24 el 92.4% es biogás, el 6% es energía eléctrica, el 1.4% es agua tratada y el 0.2% es temperatura

Para finalizar se realiza un pronóstico del biogás mediante el modelo de autorregresión vectorial y se obtuvo que el comportamiento del biogás se va a mantener constante a los valores proyectados en los periodos pasados, esto en el horizonte de 24 meses con una certidumbre del 95%, lo cual se puede observar en la Figura 29. (Ver resultados complementarios en “Anexo 15. Resultados De Modelo De Autorregresión Vectorial”)

**FIGURA 29. FORECAST VAR PARA BIOGÁS**



De los 3 métodos restantes (ETS, AUTO.ARIMA y NNAR) podemos observar como el comportamiento de las variables son muy similares para cada una de las plantas, por lo que para seleccionar el método que mejor nos ayude a pronosticar usaremos la función accuracy, la cual nos arroja las medidas de precisión calculadas sobre los datos de entrenamiento. Estas medidas son:

- ME: Mean Error (error medio)
- RMSE: Root Mean Squared Error (error cuadrático medio de la raíz)
- MAE: Mean Absolute Error (error absoluto medio)
- MPE: Mean Percentage Error (error de porcentaje medio)
- MAPE: Mean Absolute Percentage Error (error de porcentaje absoluto medio)
- MASE: Mean Absolute Scaled Error (error escalado absoluto medio)
- ACF1: Autocorrelation of errors at lag 1 (autocorrelación de errores en lag 1)

El conjunto de pruebas que usaremos para definir la precisión son la RMSE ya que mide el error que hay entre dos conjuntos de datos, es decir, compara un valor predicho y un valor observado o conocido; MAPE ya que mide la exactitud de un método para la construcción ajustada de valores; y MASE ya que permite comparar la precisión del pronóstico entre series con diferentes unidades.

En la Tablas 6 y Tabla 7 se muestran las medidas de precisión calculadas por cada uno de los métodos y modelos para cada una de las plantas, identificando los valores mínimos para seleccionar el modelo o método idóneo, por lo que para el caso de la planta “Dulces Nombres” se usará el pronóstico del método NNAR para las variables de producción de biogás y temperatura, y del método ETS para las variables de cantidad de energía eléctrica consumida y de agua tratada. En cambio, para la planta “Norte” se usará el pronóstico del método NNAR para todas las variables de estudio.

**TABLA 6. MEDIDAS DE PRECISIÓN CALCULADAS PARA LA PLANTA “DULCES NOMBRES”**

| BIOGÁS                   |              |           |           |             |          |           |              |
|--------------------------|--------------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|--------------|
|                          | ME           | RMSE      | MAE       | MPE         | MAPE     | MASE      | ACF1         |
| ETS                      | 0.01942107   | 0.4755674 | 0.369698  | -0.4957351  | 8.673838 | 0.5959963 | -0.04778403  |
| AUTO.ARIMA               | 0.02640549   | 0.5090094 | 0.4030507 | -0.5615247  | 9.450306 | 0.6497647 | -0.001181889 |
| NNAR                     | 0.02632826   | 0.4689801 | 0.36893   | -0.5692765  | 8.287099 | 0.5947581 | 0.04205551   |
| ENERGÍA ELÉCTRICA        |              |           |           |             |          |           |              |
|                          | ME           | RMSE      | MAE       | MPE         | MAPE     | MASE      | ACF1         |
| ETS                      | 0.008782062  | 0.1748544 | 0.1349576 | 0.05809498  | 3.636589 | 0.5327814 | 0.1859897    |
| AUTO.ARIMA               | 0.001821378  | 0.1974306 | 0.1518339 | -0.1581238  | 4.112523 | 0.5994054 | 0.001665128  |
| NNAR                     | 0.005882467  | 0.1965052 | 0.1560919 | -0.1443904  | 4.170698 | 0.616215  | 0.04399546   |
| CANTIDAD DE AGUA TRATADA |              |           |           |             |          |           |              |
|                          | ME           | RMSE      | MAE       | MPE         | MAPE     | MASE      | ACF1         |
| ETS                      | 0.04685443   | 0.738121  | 0.5202107 | 0.1223887   | 3.566862 | 0.4676825 | 0.105856     |
| AUTO.ARIMA               | 0.01293326   | 0.8236723 | 0.5692794 | -0.09457179 | 3.913202 | 0.5117965 | -0.03061874  |
| NNAR                     | 0.02576372   | 0.7597663 | 0.5507877 | -0.1291561  | 3.749256 | 0.495172  | 0.1250279    |
| TEMPERATURA              |              |           |           |             |          |           |              |
|                          | ME           | RMSE      | MAE       | MPE         | MAPE     | MASE      | ACF1         |
| ETS                      | -0.003813509 | 1.097191  | 0.8905101 | -0.3600569  | 4.429608 | 0.7066807 | -0.01617708  |
| AUTO.ARIMA               | 0.02068561   | 1.053721  | 0.8222521 | -0.1065574  | 4.149073 | 0.6525133 | -0.05498905  |
| NNAR                     | 0.03246104   | 0.8938892 | 0.6973227 | -0.09569565 | 3.437972 | 0.5533733 | 0.07636855   |

**TABLA 7. MEDIDAS DE PRESIÓN CALCULADAS PARA LA PLANTA “NORTE”**

| BIOGÁS                   |              |           |           |             |          |           |             |
|--------------------------|--------------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|-------------|
|                          | ME           | RMSE      | MAE       | MPE         | MAPE     | MASE      | ACF1        |
| ETS                      | 0.009319728  | 0.2773827 | 0.2123494 | -12.79123   | 24.36389 | 0.6391073 | 0.06927494  |
| AUTO.ARIMA               | 0.01551521   | 0.2739224 | 0.2098267 | -12.43199   | 24.06094 | 0.6315147 | -0.01828561 |
| NNAR                     | 0.03101815   | 0.2307029 | 0.1763648 | -1.680561   | 11.55043 | 0.5308045 | 0.1403092   |
| ENERGÍA ELÉCTRICA        |              |           |           |             |          |           |             |
|                          | ME           | RMSE      | MAE       | MPE         | MAPE     | MASE      | ACF1        |
| ETS                      | 0.008835165  | 0.1961832 | 0.1209775 | -2.696827   | 9.360144 | 0.5135753 | 0.08858739  |
| AUTO.ARIMA               | 0.01739908   | 0.1897754 | 0.1180281 | -2.221123   | 9.126269 | 0.5010544 | -0.08029034 |
| NNAR                     | 0.01599644   | 0.1557933 | 0.1105964 | -1.175195   | 7.332616 | 0.4695052 | 0.2462826   |
| CANTIDAD DE AGUA TRATADA |              |           |           |             |          |           |             |
|                          | ME           | RMSE      | MAE       | MPE         | MAPE     | MASE      | ACF1        |
| ETS                      | 0.01269267   | 0.5143154 | 0.3348814 | -10.01885   | 16.23437 | 0.5493015 | 0.09467412  |
| AUTO.ARIMA               | 0.04044723   | 0.5549009 | 0.3718662 | -10.93909   | 17.87248 | 0.6099671 | -0.06589168 |
| NNAR                     | 0.05953379   | 0.4633672 | 0.3517141 | -1.904951   | 8.699272 | 0.5769119 | 0.1429817   |
| TEMPERATURA              |              |           |           |             |          |           |             |
|                          | ME           | RMSE      | MAE       | MPE         | MAPE     | MASE      | ACF1        |
| ETS                      | -0.003813509 | 1.097191  | 0.8905101 | -0.3600569  | 4.429608 | 0.7066807 | -0.01617708 |
| AUTO.ARIMA               | 0.02068561   | 1.053721  | 0.8222521 | -0.1065574  | 4.149073 | 0.6525133 | -0.05498905 |
| NNAR                     | 0.03175333   | 0.8874544 | 0.6942014 | -0.09860791 | 3.425033 | 0.5508964 | 0.04354532  |

Una vez que se seleccionan los modelos para cada una de las variables, se obtienen de cada uno sus respectivos valores de los pronósticos, obteniendo la información que se muestra en la Tabla 9.

En la Tabla 8 se muestran los valores pronóstico para las variables de cada una de las plantas.

**TABLA 8. VALORES PRONÓSTICO PARA VARIABLES DE ESTUDIO**

| PLANTA “DULCES NOMBRES” |      |                    |                    |                   | PLANTA “NORTE” |                    |                    |                   |            |
|-------------------------|------|--------------------|--------------------|-------------------|----------------|--------------------|--------------------|-------------------|------------|
|                         |      | BIOGAS<br>MMm3/mes | ENERGIA<br>GWh/mes | GASTO<br>MMm3/mes | TEMP<br>°C     | BIOGAS<br>MMm3/mes | ENERGIA<br>GWh/mes | GASTO<br>MMm3/mes | TEMP<br>°C |
| Oct                     | 2020 | 4.665114           | 4.093405           | 18.61735          | 22.9615        | 2.18211            | 2.146896           | 6.320663          | 22.79247   |
| Nov                     | 2020 | 4.848291           | 4.187733           | 18.64184          | 17.81861       | 2.191339           | 2.146191           | 6.310232          | 17.65547   |
| Dec                     | 2020 | 5.133095           | 4.227296           | 18.62432          | 15.56716       | 2.161052           | 2.145742           | 6.317228          | 15.46319   |
| Jan                     | 2021 | 5.549147           | 4.307371           | 18.60496          | 15.00241       | 2.176087           | 2.147161           | 6.328571          | 14.91873   |
| Feb                     | 2021 | 5.576451           | 4.289291           | 17.74738          | 18.50639       | 2.20441            | 2.146392           | 6.236029          | 18.50424   |
| Mar                     | 2021 | 5.817503           | 4.378871           | 18.50522          | 20.14546       | 2.196879           | 2.148796           | 6.285305          | 20.78639   |
| Apr                     | 2021 | 5.670556           | 4.253479           | 18.19875          | 24.21612       | 2.205614           | 2.147326           | 6.29237           | 24.44438   |
| May                     | 2021 | 5.704352           | 4.317922           | 18.33424          | 26.46147       | 2.211289           | 2.148687           | 6.332117          | 26.71949   |
| Jun                     | 2021 | 5.58502            | 4.302462           | 18.43154          | 27.35891       | 2.218439           | 2.147663           | 6.340426          | 27.60316   |
| Jul                     | 2021 | 5.711401           | 4.231678           | 18.77168          | 27.96698       | 2.219534           | 2.148134           | 6.355848          | 28.2001    |

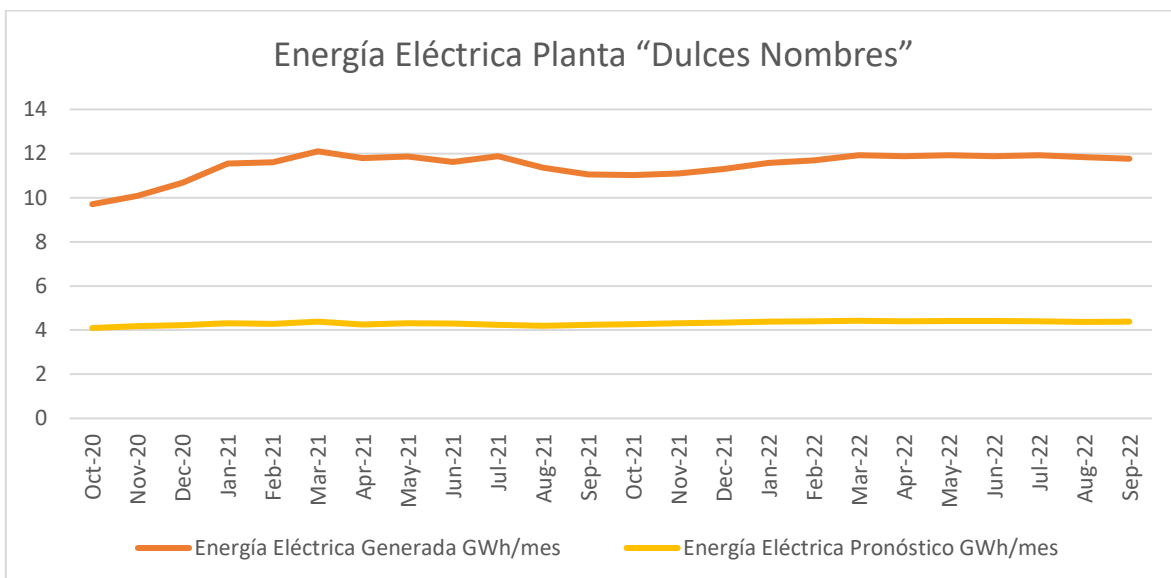


|     |      |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Aug | 2021 | 5.461124 | 4.187903 | 18.81580 | 28.14233 | 2.225233 | 2.148222 | 6.3373   | 28.04964 |
| Sep | 2021 | 5.316173 | 4.236314 | 18.89876 | 25.40132 | 2.253904 | 2.14477  | 6.322195 | 25.05068 |
| Oct | 2021 | 5.302393 | 4.265777 | 18.86289 | 22.75621 | 2.239894 | 2.146228 | 6.311487 | 22.24297 |
| Nov | 2021 | 5.334219 | 4.310507 | 18.87995 | 18.06207 | 2.240492 | 2.146225 | 6.307268 | 17.29785 |
| Dec | 2021 | 5.430664 | 4.343122 | 18.87253 | 15.28635 | 2.24178  | 2.146178 | 6.306252 | 15.01393 |
| Jan | 2022 | 5.563531 | 4.38052  | 18.87592 | 14.69454 | 2.243879 | 2.146218 | 6.306772 | 14.61208 |
| Feb | 2022 | 5.623744 | 4.393703 | 18.62378 | 17.29138 | 2.242837 | 2.146207 | 6.304013 | 17.67676 |
| Mar | 2022 | 5.73104  | 4.423561 | 18.77639 | 19.82652 | 2.243133 | 2.146241 | 6.304726 | 19.94165 |
| Apr | 2022 | 5.714734 | 4.401843 | 18.72961 | 23.77715 | 2.243248 | 2.146221 | 6.305032 | 24.19998 |
| May | 2022 | 5.729995 | 4.416885 | 18.78371 | 26.46643 | 2.243295 | 2.146241 | 6.306801 | 26.74512 |
| Jun | 2022 | 5.712519 | 4.417114 | 18.79163 | 27.56962 | 2.243201 | 2.146226 | 6.307775 | 27.84005 |
| Jul | 2022 | 5.730479 | 4.392974 | 18.87690 | 28.00497 | 2.243196 | 2.146233 | 6.308805 | 28.16641 |
| Aug | 2022 | 5.69195  | 4.368281 | 18.90416 | 28.34167 | 2.243129 | 2.146234 | 6.308495 | 28.33072 |
| Sep | 2022 | 5.658813 | 4.379818 | 18.93800 | 25.84309 | 2.242835 | 2.146183 | 6.307833 | 25.28181 |

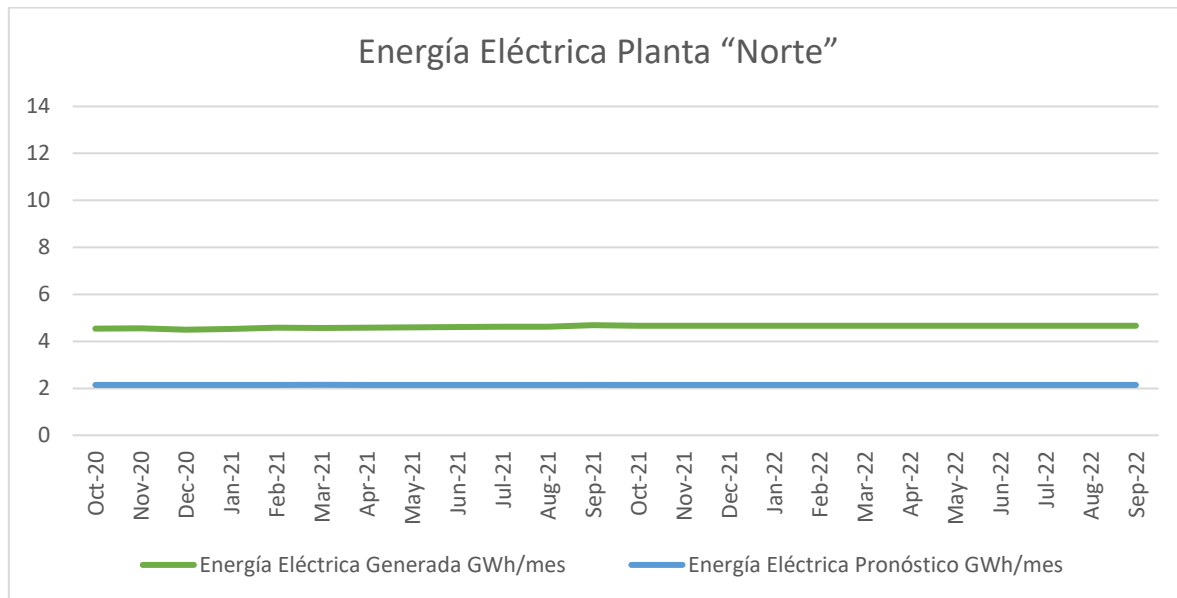
En la Figura 30 y Figura 31 podemos ver los gráficos donde se puede observar la energía eléctrica calculada que cada una de las plantas pudiera estar generando mediante el aprovechamiento del biogás como combustible para la generación de electricidad vs la energía pronóstico que cada una de las plantas pudiera estar demandando para la operación de esta.

La planta “Dulces Nombres” pudiera estar generando adicional a la energía requerida desde un 137% hasta un 180% de energía adicional, mientras que para la planta “Norte” desde un 109% hasta un 118% extra de energía eléctrica.

**FIGURA 30. CANTIDAD DE ENERGÍA ELECTRICA GENERADA VS PRONÓSTICO PARA PLANTA “DULCES NOMBRES”**



**FIGURA 31. CANTIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEMANDADA VS PRONÓSTICO PARA PLANTA “NORTE”**



Por último, en la Tabla 9 se muestra la cantidad de toneladas de dióxido de carbono equivalente que se estarían reduciendo al emplear el biogás como combustible para la generación de energía eléctrica.

**TABLA 9. REDUCCIÓN DE TONELADAS DE DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE**

|        | “Dulces Nombres” | “Norte”    |
|--------|------------------|------------|
| Oct-20 | 8923.62290       | 4680.23328 |
| Nov-20 | 9129.25794       | 4678.69638 |
| Dic-20 | 9215.50528       | 4677.71756 |
| Ene-21 | 9390.06878       | 4680.81098 |
| Feb-21 | 9350.65438       | 4679.13456 |
| Mar-21 | 9545.93878       | 4684.37528 |
| Abr-21 | 9272.58422       | 4681.17068 |
| May-21 | 9413.06996       | 4684.13766 |
| Jun-21 | 9379.36716       | 4681.90534 |
| Jul-21 | 9225.05804       | 4682.93212 |
| Ago-21 | 9129.62854       | 4683.12396 |
| Sep-21 | 9235.16452       | 4675.59860 |
| Oct-21 | 9299.39386       | 4678.77704 |
| Nov-21 | 9396.90526       | 4678.77050 |
| Dic-21 | 9468.00596       | 4678.66804 |
| Ene-22 | 9549.53360       | 4678.75524 |
| Feb-22 | 9578.27254       | 4678.73126 |
| Mar-22 | 9643.36298       | 4678.80538 |
| Abr-22 | 9596.01774       | 4678.76178 |
| May-22 | 9628.80930       | 4678.80538 |
| Jun-22 | 9629.30852       | 4678.77268 |
| Jul-22 | 9576.68332       | 4678.78794 |
| Ago-22 | 9522.85258       | 4678.79012 |
| Sep-22 | 9548.00324       | 4678.67894 |

## CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

### SÍNTESIS Y RESPUESTA A LAS PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.

Gracias al presente trabajo de investigación se determinó la posible cantidad de metano (principal componente del biogás), para los próximos 24 meses, producido en las plantas de tratamiento de agua de aguas residuales “Dulces Nombres” y “Norte”, en las cuales se procesa el aproximadamente el 80% del total de las aguas residuales de la Zona Metropolitana de Monterrey, además de que se obtuvo la posible cantidad de energía eléctrica que se pudiera estar produciendo mediante a la utilización del biogás como combustible para la generación de la energía eléctrica.

Mediante los métodos ETS, ARIMA, Redes Neuronales, Modelos Dinámicos y de Autorregresión Vectorial se desarrollaron los pronósticos a 24 meses, seleccionando el método de Redes Neuronales como el idóneo para pronosticar la cantidad de agua residual que va a ser tratada de forma mensual en las plantas de tratamiento de agua objeto de este estudio, la cantidad de energía eléctrica que éstas van a demandar para la operación de las mismas, la cantidad de biogás que pudiera ser generado en las plantas así como la demanda de energía eléctrica que pudieran ser capaces de satisfacer al usar el biogás como combustible para la generación de energía.

Analizando la serie de tiempo de la cantidad de agua residual que se ha tratado en las plantas desde enero de 2007 hasta septiembre de 2020, se observó cómo se ha incrementado la demanda de agua conforme ha pasado el tiempo, lo cual se esperaba que pasara ya que la concentración de población ha ido aumentando considerablemente según los últimos reportes del INEGI. Al realizar el pronóstico al horizonte de tiempo establecido, se pudo observar que las capacidades actuales con las que cuenta cada una de las plantas, pueden operar sin problema en los próximos años, por lo que no es necesario hacer obras adicionales que ayuden a incrementar los flujos de operación.

Analizando la serie de tiempo de la cantidad de metano (principal componente del biogás) generado por el agua residual que se ha tratado en las plantas desde enero de 2007 hasta septiembre de 2020, se llegó a la conclusión de que la producción de este gas está relacionado directamente con la cantidad de agua procesada, por lo que con ello se puede realizar un cálculo de la posible cantidad de energía eléctrica que se pudiera estar generando de manera mensual si se aprovechara este gas como combustible para la generación de energía eléctrica para los próximos 24 meses.

De igual manera, se realizó el análisis de la serie de tiempo de la energía eléctrica que requieren las plantas de tratamiento para su operación así como su proyección en el horizonte de tiempo

establecido, lo cual sirvió para compararlo contra la posible cantidad de energía eléctrica que se pudiera estar generando, llegando a la conclusión de que en los próximos 24 meses las plantas de tratamiento de agua “Dulces Nombres” y “Norte” pueden ser autosuficientes energéticamente, lo cual pudiera traer beneficios económicos para Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey ya que eliminaría el gasto por concepto de adquisición de energía eléctrica, además de que para la planta “Dulces Nombres” existe un remanente desde el 137% hasta el 180% de la energía eléctrica generada y para la planta “Norte” desde el 109% hasta el 118%, la cual pudiera ser aprovechada para su venta a particulares, o bien, como complemento en el suministro de energía para los servicios públicos de la Zona Metropolitana de Monterrey, además de hacer un cambio de paradigma en el uso de agua tratada para ciertas actividades que lo permitan como la agricultura y procesos industriales, con el fin de preservar el agua potable para las actividades esenciales ya que es un recurso limitado que cada vez se presenta con mayor escasez.

De esta manera se estaría logrando lo que menciona el Grupo Banco Nacional de hacer de los residuos un recurso, así como cumplir con los principios de la economía circular, ya que al realizar este proyecto se estaría reduciendo la contaminación ya que el metano es un gas de efecto invernadero altamente peligroso, evitando la emisión en promedio de 9,283.49 y 4,679.99 toneladas de dióxido de carbono equivalentes para las plantas “Dulces Nombres” y “Norte” respectivamente; así como se procuraría mantener el recurso del agua potable para su uso, además de que al estar generando energía renovable se estaría ayudando reducir el impacto ambiental ayudando a regenerar los sistemas naturales.

También se pudo constatar que a nivel internacional existen políticas que incentivan a la generación de energías sustentables y comenzar a reducir el consumo de combustibles fósiles, a un adecuado uso del agua como recurso, así como una exigencia para su tratado antes de ser vertido al ecosistema de nueva cuenta, además de que estimulan el tratamiento y la utilización del biogás con el fin de evitar ser emitido al medio ambiente y que sea perjudicial debido a que es un gas de efecto invernadero bastante nocivo. Por otro lado, a nivel nacional existen iniciativas para la utilización de energías limpias, sin embargo, no existen políticas que obliguen a reducir el consumo de energía generada por medio de combustibles fósiles e incrementen el uso de energías sustentables.

## APRENDIZAJES Y HALLAZGOS EN EL PROCESO DE INVESTIGACIÓN

Gracias a este proyecto de investigación se detectó que solamente por el uso del biogás para la generación de energía eléctrica se logran cumplir con seis de los objetivos para el desarrollo sustentable establecidos por el Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo entre los que se encuentran:

- “Agua Limpia y Saneamiento”: El 100% de las aguas residuales que se generan en la Zona Metropolitana de Monterrey son tratadas y se vierten a los cuerpos de agua naturales libres de contaminantes.
- “Energía Asequible y no Contaminante”: Se estaría generando energía limpia para autoconsumo de las plantas de tratamiento de agua haciéndolas autosostenibles energéticamente.
- “Industria, Innovación e Infraestructura”. Se estarían generando obras de infraestructura para poder llevar a cabo los procesos de generación de energía, así como la infraestructura necesaria para el aprovechamiento de la energía generada, además de buscar nuevas tecnologías que pudieran eficientizar los procesos de saneamiento.
- “Ciudades y Comunidades Sostenibles”. Al generar energía limpia además, ésta pudiera ser aprovechada para servicios públicos de la Zona Metropolitana de Monterrey; como por ejemplo aumentar el número de luminarias de alumbrado público funcionales para generar mayor seguridad en la sociedad.
- “Producción y Consumo Responsables”: Al implementar los cambios de consumo de agua potable, y se utilicen las aguas tratadas para actividades que así lo permitan, se estaría haciendo uso responsable del recurso
- “Acción por el Clima”. Al aprovechar el biogás que es un gas de efecto invernadero altamente contaminante, se estaría reduciendo el impacto ambiental al dejar de emitir este GEI ayudando a combatir la lucha contra el cambio climático.

Uno de los hallazgos es que a México le hace falta generar políticas públicas que obliguen una transición más rápida y eficaz para el uso de energías limpias, ya que actualmente la apuesta mayor es hacia las energías generadas a través de combustibles fósiles, además de que el impacto ambiental que se genera por estas actividades es cada vez más preocupante ya que es un tema de suma importancia a nivel mundial del que en México no se ven acciones para mitigar este impacto y evitar problemas futuros.

Unos de los aprendizajes más relevantes al realizar este proyecto es el cómo hacer de los residuos nuevos recursos, lo cual se complementa con el tema de la economía circular, ya que al aprovechar al máximo un recurso en todas y cada una de sus fases puede ser benéfico para el desarrollo.

#### **LIMITACIONES Y SUGERENCIAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES.**

Este proyecto de investigación representa un esfuerzo inicial para estudiar con mayor profundidad el impacto que pudiera tener el uso del biogás que se produce en las plantas de tratamiento de agua residuales para la producción de energía eléctrica, ya que en la actualidad a nivel mundial es un tema poco estudiado y en México existen algunos proyectos que llevan a cabo esta acción, sin embargo, no existen estudios en forma de los cuales se pueda obtener información.

Una de las limitaciones más relevantes que se tuvo al realizar este proyecto es que no se contaban con los datos del biogás producido en las plantas de tratamiento de agua objeto de este estudio, por lo que se procedió a realizar un cálculo para obtener esta variable que al ser comparadas contra los datos que se tenía presentaban algunas variaciones, por lo que se tendría que revisar qué factores están influyendo para que las plantas de tratamiento indicaran una producción menor en los registros al teórico.

Otra de las limitaciones son la cantidad de datos con los que se cuenta de las plantas, ya que, al querer hacer pronósticos a mediano y largo plazo, el grado de incertidumbre de los valores son demasiados altos.

Por último, esta investigación pretende demostrar la importancia de impulsar el desarrollo de energías limpias que estén alineados a cumplir con la mayor cantidad de objetivos para el desarrollo sustentable, así como hacer de los residuos recursos y generar una economía circular en base a estos recursos, ya que esto traerá mayor desarrollo y mejorará la calidad de vida de las sociedades.

## BIBLIOGRAFÍA

- Amador Díaz, A. & Veliz Lorenzo, E. & Bataller Venta, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 46, 1-10
- Bitar, S. (2015). América Latina Debe Pensar en el Futuro. *Planeación Prospectiva Estratégica. Teorías, Metodologías y Buenas Prácticas en América Latina*. 53-68.
- Bodík, I. & Sedláček, S. & Kubaská, M & Hutòan, M. (2010). Biogas Production in Municipal Wastewater Treatment Plants - Current Status in EU with a Focus on the Slovak Republic. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly* 25, 335-340
- Cadena Iñiguez, P., & Rendón Medel, R., & Aguilar Ávila, J., & Salinas Cruz, E., & De la Cruz Morales, F., & Sangerman Jarquín, D. (2017). Métodos cuantitativos, métodos cualitativos o su combinación en la investigación: un acercamiento en las ciencias sociales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8 (7), 1603-1617.
- CONAPO (Consejo Nacional de Población). (2018). Proyecciones de la Población de México y de las Entidades Federativas, 2016-2050. Disponible en: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-y-de-las-entidades-federativas-2016-2050>
- De Lovinfosse, I. (2008). How and Why Do Policies Change? A Comparison of Renewable Electricity Policies in Belgium, Denmark, Germany, the Netherlands and the UK. *PIE Peter Lang, Bélgica*, p. 317
- Eloriaga, J. (2020). A Deep Dive on Autoregression in R. *Towards Data Science*. Disponible en: <https://towardsdatascience.com/a-deep-dive-on-vector-autoregression-in-r-58767ebb3f06>
- ENRES (Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México). (2017). Análisis de instrumentos de política pública para estimular la valorización energética de residuos urbanos en México y propuestas para mejorarlos y ampliarlos. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/documentos/analisis-de-instrumentos-de-politica-publica-para-estimular-valorizacion-energetica-de-residuos-urbanos-en-mexico-y-propuestas-de-mejora>
- ENRES (Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México). (2017). Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas

residuales. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/265430/Guia\\_lodos\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/265430/Guia_lodos_2017.pdf)

Estrada Gasca, C. (2013). Transición energética, energías renovables y energía solar de potencia. *Revista Mexicana de Física*, 59 (2), 75-84.

EY México. (2018). Nueva Era de la Energía en México. Disponible en: [https://www.energypartnership.mx/fileadmin/user\\_upload/mexico/media\\_elements/reports/NuevaEraEnergiaMexico\\_ESP.pdf](https://www.energypartnership.mx/fileadmin/user_upload/mexico/media_elements/reports/NuevaEraEnergiaMexico_ESP.pdf)

Finon, D. & Pérez, Y. (2007). The social efficiency of instruments of promotion of renewable energies: A transaction-cost perspective, *Ecological Economics* 62, 77-92.

Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, Presidencia de la República. (2007). *Visión 2030: El México Que Queremos*. Disponible en: <https://archivo.cepal.org/pdfs/GuiaProspectiva/VisionMexico2030.pdf>

Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. (2013). *Reforma Energética*. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164370/Resumen\\_de\\_la\\_explicacion\\_de\\_la\\_Reforma\\_Energetica11\\_1\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164370/Resumen_de_la_explicacion_de_la_Reforma_Energetica11_1_.pdf)

Gu, Y., & Li, Y., & Li, X., & Luo, P., & Wang, H., & Wang, X., & Wu, J., & Li, F. (2017). Energy self-sufficient wastewater treatment plants: feasibilities and challenges. *Energy Procedia* 105, 3741 – 3751

Hernández, C. & Pedraza, L. & Escobar, A. (2008). Aplicaciones de las series de tiempo en modelos de tráfico para una red de datos. *Scientia et Technica* (18), 31-36

Hernández, S. & Sánchez, E. & François, J. & Díaz, L. (2014). Análisis de un Proceso de Tratamiento de Efluentes para Producción de Metano. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 11, 236-246.

Hyndman, R. & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and Practice*. US: Texts Online. Disponible: <https://otexts.org/fpp2/>

IMP (Instituto Mexicano del Petróleo). (2020). *Reporte de Inteligencia Tecnológica. Biocombustibles Gaseosos*. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/329908/Reporte\\_Inteligencia\\_Tecnologica\\_BIOGAS\\_Final.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/329908/Reporte_Inteligencia_Tecnologica_BIOGAS_Final.pdf)



- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). (2016). Revisión y actualización del potencial de biomasa para generación de energía eléctrica a partir de plantas de tratamiento de aguas residuales presentado en el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE). Disponible en: <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1775>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2015). Censo y Conteo de Población y Vivienda. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/datos/?ps=Programas>
- Islas Samperio, J., & Grande Acosta, G. (2013). Políticas públicas para impulsar las energías renovables en México. *Revista Mexicana de Física*, 59 (2), 1-14.
- López Torres, M., & Veliz, E., & Fernández García, L., & Espinosa Lloréns, M. (2010). Tratamiento de lodos. Una etapa necesaria dentro del proceso tecnológico. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 41, 1-6.
- Madlener, R & Stagl, S. (2005). Sustainability-guided promotion of renewable electricity generation. *Ecological Economics* 53, 147-167.
- Makisha, N. (2016). Wastewater and biogas – ecology and economy. *Procedia Engineering*, 165, 1092-1097
- Makisha, N. & Semenova, D. (2018) Production of biogas at wastewater treatment plants and its further application. *MATEC Web of conferences* 144, 04016
- Menanteau, P.& Finon, D. & Lamy, M. (2003). Prices versus quantities: choosing policies for promoting the development of renewable energy, *Energy Policy* 31, 799-812.
- Mojica, F. (2006). Concepto y Aplicación de la Prospectiva Estratégica. *Revista Med*, 4 (1), 122-131.
- Mojica, F. (2008). Forecasting y Prospectiva: dos alternativas complementarias para adelantarnos al futuro.
- Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- National Intelligence Council (U.S.). (2012). Global trends 2030: Alternative worlds: a publication of the National Intelligence Council. December 2012.

- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2018). Cambio climático y salud. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health#:~:text=Datos%20y%20cifras&text=Seg%C3%BAAn%20se%20prev%C3%A9%20entre%20030,diarrea%20y%20el%20estr%C3%A9s%20cal%C3%B3rico>.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2019). Agua. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water#:~:text=De%20aqua%C3%AD%20a%202025%2C%20la,servicios%20de%20gesti%C3%B3n%20de%20desechos>.
- Parra Orobio, B., & Torres Lozada, P., & Marmolejo Rebellón, L., & Torres López, W., & Fuentes López, L., & Ossa Arias, M., & Barba Ho, L. (2016). Evaluación de lodos de PTAR municipales como inóculos en la digestión anaerobia de biorresiduos. *Revista ION*, 29 (1), 37-46.
- Pfaffenberger, W. & Jahn, K. & Djourdjini, M. (2006). Renewable energies – environmental benefits, economic growth and job creation. IMV – Environmental Assessment Institute/Bremer Energy Institute, Dinamarca.
- Policy Horizons Canada. (2018). Foresight vs Forecast. Canada Beyond 150 Disponible en: <http://canadabeyond150.ca/blog/2018/03/foresightvsforecast/#:~:text=Foresight%20does%20not%20predict%20the,and%20the%20analysis%20of%20trends>. Diciembre 2,2020
- REMBIO. (2012). Cuaderno Temático sobre BIOENERGÍA Producción de biogás en México. Disponible en:
- Rodríguez, D. & Serrano, H. & Delgado, A. & Nolasco, D. y Saltiel, G. (2020). De residuo a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe” Banco Mundial, Washington, DC.
- Rössel Kipping, D., & Ortiz Laurel, H. (2013). Combustible Biogás en Celdas de Hidrógeno. *Conciencia Tecnológica*, (45), 37-40.
- Secretaría de Economía y Trabajo de Nuevo León. (2020). N. L. Población Total y por municipio. Disponible en: <http://datos.nl.gob.mx/n-l-poblacion-total-y-por-municipio/>
- SENER (Secretaría de Energía). (2017). Mapa de Ruta Tecnológica Biogás. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/329895/Mapa\\_Ruta\\_Tecnologica\\_BIO\\_GAS\\_Final-Red.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/329895/Mapa_Ruta_Tecnologica_BIO_GAS_Final-Red.pdf)

- SENER (Secretaría de Energía). (2018). Prospectivas de Energías Renovables 2018-2032. Disponible en: [https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PER\\_18\\_32\\_F.pdf](https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PER_18_32_F.pdf)
- Trujillo Herminio, T. (2010). La Metodología del Vector Autorregresivo: Presentación y Algunas Aplicaciones. UCV – Scientia, 2 (2)
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. París, UNESCO. Disponible en: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2017-wastewater-the-untapped-resource/>
- World Energy Council. (2013). World Energy Perspective Cost of Energy Technologies. Disponible en: [https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WEC\\_J1143\\_CostofTECHNOLOGIES\\_021013\\_WEB\\_Final.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WEC_J1143_CostofTECHNOLOGIES_021013_WEB_Final.pdf)

## ANEXOS

### ANEXO 1. CENSO POBLACIÓN MUNICIPIOS DE LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY, N. L.

| MUNICIPIO            | AÑO  | POBLACIÓN | MUNICIPIO                | AÑO  | POBLACIÓN |
|----------------------|------|-----------|--------------------------|------|-----------|
| Apodaca              | 1990 | 115,913   | Monterrey                | 1990 | 1,069,238 |
|                      | 1995 | 219,153   |                          | 1995 | 1,088,143 |
|                      | 2000 | 283,497   |                          | 2000 | 1,110,997 |
|                      | 2005 | 418,784   |                          | 2005 | 1,133,814 |
|                      | 2010 | 523,370   |                          | 2010 | 1,135,550 |
|                      | 2015 | 597,207   |                          | 2015 | 1,109,171 |
| Cadereyta de Jiménez | 1990 | 53,582    | San Nicolás de los Garza | 1990 | 436,603   |
|                      | 1995 | 62,440    |                          | 1995 | 487,924   |
|                      | 2000 | 75,059    |                          | 2000 | 496,878   |
|                      | 2005 | 73,746    |                          | 2005 | 476,761   |
|                      | 2010 | 86,445    |                          | 2010 | 443,273   |
|                      | 2015 | 95,534    |                          | 2015 | 430,143   |
| García               | 1990 | 13,164    | San Pedro Garza García   | 1990 | 113,040   |
|                      | 1995 | 23,981    |                          | 1995 | 120,913   |
|                      | 2000 | 28,974    |                          | 2000 | 125,978   |
|                      | 2005 | 51,658    |                          | 2005 | 122,009   |
|                      | 2010 | 143,668   |                          | 2010 | 122,659   |
|                      | 2015 | 247,370   |                          | 2015 | 123,156   |
| General Escobedo     | 1990 | 98,147    | Santa Catarina           | 1990 | 163,848   |
|                      | 1995 | 176,869   |                          | 1995 | 202,156   |
|                      | 2000 | 233,457   |                          | 2000 | 227,026   |
|                      | 2005 | 299,364   |                          | 2005 | 259,896   |
|                      | 2010 | 357,937   |                          | 2010 | 268,955   |
|                      | 2015 | 425,148   |                          | 2015 | 296,954   |
| Guadalupe            | 1990 | 535,560   | Salinas Victoria         | 1990 | 9,518     |
|                      | 1995 | 618,933   |                          | 1995 | 15,925    |
|                      | 2000 | 670,162   |                          | 2000 | 19,024    |
|                      | 2005 | 691,931   |                          | 2005 | 27,848    |
|                      | 2010 | 678,006   |                          | 2010 | 32,660    |
|                      | 2015 | 682,880   |                          | 2015 | 54,192    |
| Juárez               | 1990 | 28,014    | Santiago                 | 1990 | 30,182    |
|                      | 1995 | 50,009    |                          | 1995 | 34,187    |
|                      | 2000 | 66,497    |                          | 2000 | 36,812    |
|                      | 2005 | 144,380   |                          | 2005 | 37,886    |
|                      | 2010 | 256,970   |                          | 2010 | 40,469    |
|                      | 2015 | 333,481   |                          | 2015 | 42,407    |

Fuente: Secretaría de Economía y Trabajo de Nuevo León, 2020 (<http://datos.nl.gob.mx/n-l-poblacion-total-y-por-municipio/>)

### ANEXO 2. CENSO POBLACIÓN DE LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY, N. L.

| AÑO  | POBLACIÓN |
|------|-----------|
| 1990 | 2,666,809 |
| 1995 | 3,100,633 |
| 2000 | 3,374,361 |
| 2005 | 3,738,077 |
| 2010 | 4,089,962 |
| 2015 | 4,437,643 |

Fuente: Secretaría de Economía y Trabajo de Nuevo León, 2020 (<http://datos.nl.gob.mx/n-l-poblacion-total-y-por-municipio/>)

**ANEXO 3. TEMPERATURAS PROMEDIO EN N. L.**

| Fecha   | Temp. Máx. | Temp. Media | Temp. Mín. | Fecha   | Temp. Máx. | Temp. Media | Temp. Mín. | Fecha   | Temp. Máx. | Temp. Media | Temp. Mín. |
|---------|------------|-------------|------------|---------|------------|-------------|------------|---------|------------|-------------|------------|
| 2007-01 | 17.0       | 11.5        | 5.9        | 2011-08 | 36.7       | 28.9        | 21.2       | 2016-03 | 29.6       | 21.6        | 13.5       |
| 2007-02 | 23.3       | 15.7        | 8.2        | 2011-09 | 35.2       | 27.4        | 19.7       | 2016-04 | 31.2       | 23.9        | 16.6       |
| 2007-03 | 27.5       | 20.1        | 12.8       | 2011-10 | 29.8       | 22.5        | 25.2       | 2016-05 | 32.6       | 26.0        | 19.4       |
| 2007-04 | 29.0       | 22.0        | 14.9       | 2011-11 | 26.5       | 18.7        | 10.8       | 2016-06 | 33.8       | 27.1        | 20.5       |
| 2007-05 | 31.0       | 24.9        | 18.7       | 2011-12 | 20.4       | 14.0        | 7.4        | 2016-07 | 37.1       | 29.5        | 22.0       |
| 2007-06 | 33.9       | 27.3        | 20.7       | 2012-01 | 23.9       | 15.8        | 7.8        | 2016-08 | 35.0       | 28.1        | 21.3       |
| 2007-07 | 32.3       | 26.5        | 20.8       | 2012-02 | 21.5       | 16.2        | 10.5       | 2016-09 | 33.3       | 26.8        | 20.4       |
| 2007-08 | 33.5       | 27.3        | 21.3       | 2012-03 | 28.6       | 20.9        | 13.6       | 2016-10 | 30.5       | 23.9        | 17.4       |
| 2007-09 | 31.7       | 25.9        | 20.0       | 2012-04 | 31.7       | 24.4        | 16.9       | 2016-11 | 26.1       | 20.4        | 14.6       |
| 2007-10 | 30.7       | 23.4        | 16.3       | 2012-05 | 33.7       | 26.3        | 18.9       | 2016-12 | 23.4       | 16.6        | 9.9        |
| 2007-11 | 25.4       | 18.5        | 11.7       | 2012-06 | 35.0       | 27.7        | 20.5       | 2017-01 | 24.8       | 16.8        | 8.9        |
| 2007-12 | 25.3       | 17.5        | 9.9        | 2012-07 | 34.6       | 27.8        | 20.8       | 2017-02 | 29.5       | 20.4        | 11.4       |
| 2008-01 | 20.9       | 13.5        | 5.9        | 2012-08 | 36.0       | 28.5        | 21.1       | 2017-03 | 29.1       | 22.0        | 14.8       |
| 2008-02 | 28.2       | 18.7        | 9.3        | 2012-09 | 33.0       | 26.1        | 19.4       | 2017-04 | 31.8       | 23.8        | 15.7       |
| 2008-03 | 29.6       | 20.2        | 10.9       | 2012-10 | 30.7       | 23.6        | 16.5       | 2017-05 | 33.4       | 26.2        | 18.9       |
| 2008-04 | 32.3       | 24.2        | 16.2       | 2012-11 | 24.5       | 19.0        | 13.3       | 2017-06 | 35.9       | 28.3        | 20.7       |
| 2008-05 | 34.7       | 27.2        | 19.7       | 2012-12 | 24.0       | 16.6        | 9.2        | 2017-07 | 35.0       | 28.0        | 21.0       |
| 2008-06 | 35.8       | 28.6        | 21.4       | 2013-01 | 21.3       | 14.6        | 8.0        | 2017-08 | 35.8       | 28.6        | 21.4       |
| 2008-07 | 31.7       | 25.9        | 20.1       | 2013-02 | 26.7       | 18.8        | 10.9       | 2017-09 | 32.8       | 26.2        | 19.6       |
| 2008-08 | 33.7       | 27.6        | 21.4       | 2013-03 | 28.4       | 20.0        | 11.5       | 2017-10 | 28.5       | 21.6        | 14.7       |
| 2008-09 | 29.8       | 24.0        | 18.4       | 2013-04 | 31.2       | 23.0        | 14.8       | 2017-11 | 27.2       | 19.6        | 12.1       |
| 2008-10 | 28.3       | 21.6        | 14.9       | 2013-05 | 32.1       | 25.3        | 18.5       | 2017-12 | 21.4       | 14.6        | 7.8        |
| 2008-11 | 25.2       | 18.2        | 11.1       | 2013-06 | 35.1       | 28.0        | 20.8       | 2018-01 | 19.9       | 12.3        | 4.7        |
| 2008-12 | 23.0       | 15.0        | 7.2        | 2013-07 | 34.1       | 27.6        | 21.0       | 2018-02 | 25.6       | 18.6        | 11.7       |
| 2009-01 | 23.4       | 15.7        | 7.9        | 2013-08 | 35.1       | 27.9        | 20.8       | 2018-03 | 29.4       | 21.5        | 13.6       |
| 2009-02 | 26.7       | 18.1        | 9.6        | 2013-09 | 30.7       | 25.1        | 19.5       | 2018-04 | 29.3       | 21.9        | 14.5       |
| 2009-03 | 27.7       | 19.8        | 11.8       | 2013-10 | 29.1       | 22.7        | 16.3       | 2018-05 | 33.0       | 26.1        | 19.2       |
| 2009-04 | 32.9       | 24.3        | 15.7       | 2013-11 | 23.0       | 17.0        | 11.0       | 2018-06 | 34.6       | 27.8        | 20.9       |
| 2009-05 | 34.1       | 26.7        | 19.4       | 2013-12 | 19.8       | 13.7        | 7.6        | 2018-07 | 35.9       | 28.1        | 20.3       |
| 2009-06 | 36.3       | 28.7        | 21.1       | 2014-01 | 21.7       | 13.5        | 5.2        | 2018-08 | 36.3       | 28.6        | 20.9       |
| 2009-07 | 36.5       | 28.5        | 20.4       | 2014-02 | 24.0       | 15.8        | 7.5        | 2018-09 | 31.3       | 25.9        | 20.5       |
| 2009-08 | 37.5       | 29.6        | 21.7       | 2014-03 | 25.6       | 18.2        | 10.8       | 2018-10 | 27.5       | 22.1        | 16.7       |
| 2009-09 | 30.8       | 25.3        | 19.7       | 2014-04 | 30.7       | 23.3        | 15.9       | 2018-11 | 23.0       | 16.3        | 9.6        |
| 2009-10 | 28.3       | 22.6        | 17.0       | 2014-05 | 31.8       | 24.6        | 17.5       | 2018-12 | 22.4       | 14.8        | 7.2        |
| 2009-11 | 25.2       | 17.5        | 9.8        | 2014-06 | 34.4       | 27.8        | 21.2       | 2019-01 | 21.5       | 14.2        | 6.9        |
| 2009-12 | 19.0       | 13.1        | 7.2        | 2014-07 | 35.3       | 28.3        | 21.3       | 2019-02 | 26.0       | 18.2        | 10.3       |
| 2010-01 | 19.1       | 12.5        | 5.9        | 2014-08 | 36.1       | 29.9        | 21.6       | 2019-03 | 26.1       | 19.4        | 12.7       |
| 2010-02 | 19.9       | 13.3        | 6.6        | 2014-09 | 30.9       | 25.4        | 20.0       | 2019-04 | 31.3       | 22.7        | 14.0       |
| 2010-03 | 26.3       | 17.6        | 8.9        | 2014-10 | 29.9       | 23.5        | 17.0       | 2019-05 | 33.2       | 26.5        | 19.8       |
| 2010-04 | 28.9       | 22.4        | 15.8       | 2014-11 | 22.9       | 15.9        | 8.9        | 2019-06 | 35.1       | 28.2        | 21.2       |
| 2010-05 | 33.3       | 26.4        | 19.4       | 2014-12 | 21.3       | 15.1        | 9.0        | 2019-07 | 35.3       | 27.9        | 20.5       |
| 2010-06 | 35.4       | 28.6        | 21.7       | 2015-01 | 19.6       | 12.9        | 6.2        | 2019-08 | 37.6       | 29.8        | 21.9       |
| 2010-07 | 31.8       | 26.6        | 21.5       | 2015-02 | 22.6       | 15.3        | 8.0        | 2019-09 | 32.5       | 26.4        | 20.3       |
| 2010-08 | 34.8       | 28.2        | 21.6       | 2015-03 | 23.2       | 17.3        | 11.4       | 2019-10 | 30.2       | 23.4        | 16.5       |
| 2010-09 | 31.4       | 25.9        | 20.4       | 2015-04 | 29.8       | 24.2        | 18.7       | 2019-11 | 25.5       | 18.3        | 11.1       |
| 2010-10 | 29.9       | 22.4        | 15.0       | 2015-05 | 30.7       | 25.1        | 19.5       | 2019-12 | 23.9       | 16.2        | 8.4        |
| 2010-11 | 26.7       | 18.3        | 10.0       | 2015-06 | 32.3       | 26.5        | 20.7       | 2020-01 | 23.5       | 16.2        | 8.9        |
| 2010-12 | 24.0       | 14.8        | 5.6        | 2015-07 | 35.3       | 28.2        | 21.1       | 2020-02 | 24.6       | 16.5        | 8.3        |
| 2011-01 | 21.5       | 14.0        | 6.6        | 2015-08 | 36.3       | 28.7        | 21.1       | 2020-03 | 30.4       | 22.9        | 15.3       |
| 2011-02 | 25.9       | 17.0        | 8.1        | 2015-09 | 33.3       | 26.7        | 20.1       | 2020-04 | 31.6       | 24.6        | 17.6       |
| 2011-03 | 30.7       | 22.3        | 13.9       | 2015-10 | 30.3       | 23.9        | 17.4       | 2020-05 | 33.1       | 26.0        | 18.9       |
| 2011-04 | 33.0       | 24.7        | 16.5       | 2015-11 | 25.6       | 19.5        | 13.4       | 2020-06 | 33.3       | 26.7        | 20.2       |
| 2011-05 | 35.7       | 28.1        | 20.5       | 2015-12 | 24.3       | 16.7        | 9.2        | 2020-07 | 35.1       | 28.3        | 21.4       |
| 2011-06 | 35.0       | 27.9        | 20.8       | 2016-01 | 22.5       | 14.1        | 5.6        | 2020-08 | 34.7       | 27.8        | 20.8       |
| 2011-07 | 34.3       | 27.9        | 21.6       | 2016-02 | 26.5       | 17.5        | 8.5        | 2020-09 | 30.9       | 24.7        | 18.6       |

Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2020

**ANEXO 4. CANTIDAD DE AGUA TRATADA EN LA PLANTA “Dulces Nombres” EN N. L.**

| Fecha      | L/s     | m3/mes   | Fecha      | L/s     | m3/mes   | Fecha      | L/s     | m3/mes   |
|------------|---------|----------|------------|---------|----------|------------|---------|----------|
| 2007-01-01 | 5782.38 | 15487518 | 2011-08-01 | 4511.80 | 12084400 | 2016-03-01 | 6374.03 | 17072200 |
| 2007-02-01 | 5061.67 | 12245197 | 2011-09-01 | 4440.24 | 11509100 | 2016-04-01 | 6424.61 | 16652600 |
| 2007-03-01 | 4794.50 | 12841595 | 2011-10-01 | 4638.81 | 12424600 | 2016-05-01 | 6386.39 | 17105320 |
| 2007-04-01 | 4841.21 | 12548410 | 2011-11-01 | 4311.43 | 11175214 | 2016-06-01 | 6517.98 | 16894600 |
| 2007-05-01 | 4989.53 | 13363949 | 2011-12-01 | 4608.57 | 12343600 | 2016-07-01 | 6707.36 | 17965000 |
| 2007-06-01 | 5196.30 | 13468810 | 2012-01-01 | 4505.75 | 12068200 | 2016-08-01 | 6640.80 | 17786729 |
| 2007-07-01 | 5264.07 | 14099289 | 2012-02-01 | 4573.12 | 11458400 | 2016-09-01 | 6667.13 | 17281200 |
| 2007-08-01 | 5455.44 | 14611840 | 2012-03-01 | 4664.02 | 12492100 | 2016-10-01 | 7235.27 | 19378960 |
| 2007-09-01 | 5474.16 | 14189010 | 2012-04-01 | 4458.66 | 11556840 | 2016-11-01 | 8560.36 | 22188460 |
| 2007-10-01 | 5279.50 | 14140609 | 2012-05-01 | 4522.69 | 12113560 | 2016-12-01 | 7306.56 | 19569880 |
| 2007-11-01 | 4956.73 | 12847840 | 2012-06-01 | 4595.60 | 11911800 | 2017-01-01 | 6830.58 | 18295020 |
| 2007-12-01 | 4990.61 | 13366837 | 2012-07-01 | 4548.09 | 12181600 | 2017-02-01 | 6995.68 | 16923940 |
| 2008-01-01 | 4974.26 | 13323066 | 2012-08-01 | 4607.65 | 12341139 | 2017-03-01 | 7009.14 | 18773280 |
| 2008-02-01 | 4880.32 | 12228120 | 2012-09-01 | 4672.69 | 12111600 | 2017-04-01 | 7188.44 | 18632434 |
| 2008-03-01 | 4702.87 | 12596180 | 2012-10-01 | 4951.31 | 13261600 | 2017-05-01 | 7337.00 | 19651420 |
| 2008-04-01 | 4909.79 | 12726180 | 2012-11-01 | 5143.52 | 13332000 | 2017-06-01 | 7156.09 | 18548580 |
| 2008-05-01 | 5086.81 | 13624500 | 2012-12-01 | 4993.65 | 13375000 | 2017-07-01 | 7046.32 | 18872860 |
| 2008-06-01 | 4811.15 | 12470500 | 2013-01-01 | 4949.30 | 13256200 | 2017-08-01 | 7091.23 | 18993160 |
| 2008-07-01 | 5198.56 | 13923821 | 2013-02-01 | 4886.08 | 11820400 | 2017-09-01 | 6578.36 | 17051120 |
| 2008-08-01 | 5397.72 | 14457250 | 2013-03-01 | 4781.96 | 12808006 | 2017-10-01 | 6979.51 | 18693920 |
| 2008-09-01 | 5370.74 | 13920951 | 2013-04-01 | 4669.96 | 12104540 | 2017-11-01 | 7181.90 | 18615480 |
| 2008-10-01 | 5372.87 | 14390704 | 2013-05-01 | 4805.14 | 12870100 | 2017-12-01 | 7086.04 | 18979260 |
| 2008-11-01 | 5001.71 | 12964433 | 2013-06-01 | 4793.52 | 12424800 | 2018-01-01 | 6833.65 | 18303260 |
| 2008-12-01 | 5024.46 | 13457513 | 2013-07-01 | 4779.94 | 12802600 | 2018-02-01 | 6601.02 | 15969192 |
| 2009-01-01 | 3478.21 | 9316036  | 2013-08-01 | 5039.35 | 13497400 | 2018-03-01 | 6695.36 | 17932860 |
| 2009-02-01 | 3830.49 | 9266730  | 2013-09-01 | 5581.02 | 14466000 | 2018-04-01 | 6898.44 | 17880760 |
| 2009-03-01 | 4386.85 | 11749728 | 2013-10-01 | 6057.50 | 16224400 | 2018-05-01 | 6982.14 | 18700951 |
| 2009-04-01 | 4603.83 | 11933135 | 2013-11-01 | 6176.85 | 16010400 | 2018-06-01 | 6868.58 | 17803370 |
| 2009-05-01 | 4561.87 | 12218525 | 2013-12-01 | 6110.59 | 16366600 | 2018-07-01 | 7630.62 | 20437840 |
| 2009-06-01 | 4610.81 | 11951230 | 2014-01-01 | 6225.51 | 16674400 | 2018-08-01 | 7285.34 | 19513050 |
| 2009-07-01 | 4576.11 | 12256657 | 2014-02-01 | 6062.42 | 14666200 | 2018-09-01 | 7284.16 | 18880530 |
| 2009-08-01 | 4486.87 | 12017638 | 2014-03-01 | 6084.62 | 16297040 | 2018-10-01 | 7101.12 | 19019640 |
| 2009-09-01 | 4466.81 | 11577973 | 2014-04-01 | 5949.77 | 15421800 | 2018-11-01 | 7645.91 | 19818210 |
| 2009-10-01 | 4373.57 | 11714160 | 2014-05-01 | 6130.75 | 16420600 | 2018-12-01 | 7595.14 | 20342810 |
| 2009-11-01 | 4586.38 | 11887897 | 2014-06-01 | 6097.69 | 15805200 | 2019-01-01 | 7683.95 | 20580690 |
| 2009-12-01 | 4465.53 | 11960464 | 2014-07-01 | 6132.77 | 16426000 | 2019-02-01 | 7277.02 | 17604564 |
| 2010-01-01 | 4159.65 | 11141215 | 2014-08-01 | 6116.64 | 16382800 | 2019-03-01 | 6906.94 | 18499560 |
| 2010-02-01 | 4265.71 | 10319615 | 2014-09-01 | 6226.85 | 16140000 | 2019-04-01 | 6736.13 | 17460050 |
| 2010-03-01 | 4254.32 | 11394766 | 2014-10-01 | 6205.42 | 16620600 | 2019-05-01 | 7016.22 | 18792250 |
| 2010-04-01 | 3789.22 | 9821664  | 2014-11-01 | 6090.12 | 15785600 | 2019-06-01 | 7010.68 | 18171675 |
| 2010-05-01 | 3849.23 | 10309770 | 2014-12-01 | 6204.54 | 16618240 | 2019-07-01 | 7110.48 | 19044720 |
| 2010-06-01 | 3704.63 | 9602402  | 2015-01-01 | 6162.20 | 16504840 | 2019-08-01 | 7013.84 | 18785860 |
| 2010-07-01 | 4554.14 | 12197800 | 2015-02-01 | 6128.94 | 14827120 | 2019-09-01 | 7360.37 | 19078068 |
| 2010-08-01 | 4545.42 | 12174460 | 2015-03-01 | 6196.85 | 16597630 | 2019-10-01 | 6726.88 | 18017284 |
| 2010-09-01 | 4525.25 | 11729450 | 2015-04-01 | 6206.74 | 16087880 | 2019-11-01 | 6918.59 | 17932980 |
| 2010-10-01 | 4524.50 | 12118420 | 2015-05-01 | 6336.39 | 16971400 | 2019-12-01 | 6726.50 | 18016270 |
| 2010-11-01 | 4526.85 | 11733600 | 2015-06-01 | 6223.49 | 16131280 | 2020-01-01 | 6667.70 | 17858760 |
| 2010-12-01 | 4384.78 | 11744200 | 2015-07-01 | 6158.98 | 16496200 | 2020-02-01 | 6358.88 | 15932800 |
| 2011-01-01 | 4279.90 | 11463273 | 2015-08-01 | 6223.49 | 16669000 | 2020-03-01 | 6924.78 | 18547320 |
| 2011-02-01 | 4428.49 | 10713400 | 2015-09-01 | 6054.34 | 15692840 | 2020-04-01 | 6568.85 | 17026460 |
| 2011-03-01 | 4475.51 | 11987200 | 2015-10-01 | 6665.43 | 17852680 | 2020-05-01 | 6525.88 | 17478920 |
| 2011-04-01 | 4437.27 | 11501400 | 2015-11-01 | 6602.52 | 17113740 | 2020-06-01 | 6904.58 | 17896680 |
| 2011-05-01 | 4542.04 | 12165400 | 2015-12-01 | 6281.82 | 16825240 | 2020-07-01 | 7161.66 | 19181800 |
| 2011-06-01 | 4552.89 | 11801100 | 2016-01-01 | 6214.50 | 16644910 | 2020-08-01 | 6981.88 | 18700280 |
| 2011-07-01 | 4548.09 | 12181600 | 2016-02-01 | 6047.59 | 15152840 | 2020-09-01 | 7284.72 | 18882002 |

Fuente: Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, 2020

**ANEXO 5. CANTIDAD DE AGUA TRATADA EN LA PLANTA “Norte” EN N. L.**

| Fecha      | L/s     | m3/mes  | Fecha      | L/s     | m3/mes  | Fecha      | L/s     | m3/mes  |
|------------|---------|---------|------------|---------|---------|------------|---------|---------|
| 2007-01-01 | 2152.26 | 5764617 | 2011-08-01 | 2297.54 | 6153736 | 2016-03-01 | 2158.35 | 5780919 |
| 2007-02-01 | 2102.09 | 5085376 | 2011-09-01 | 2284.46 | 5921333 | 2016-04-01 | 2123.73 | 5504707 |
| 2007-03-01 | 1789.71 | 4793566 | 2011-10-01 | 2182.34 | 5845174 | 2016-05-01 | 2108.26 | 5646767 |
| 2007-04-01 | 1724.38 | 4469589 | 2011-11-01 | 2077.73 | 5385468 | 2016-06-01 | 2046.06 | 5303388 |
| 2007-05-01 | 1955.94 | 5238780 | 2011-12-01 | 2106.07 | 5640889 | 2016-07-01 | 2143.41 | 5740899 |
| 2007-06-01 | 2289.37 | 5934058 | 2012-01-01 | 1983.55 | 5312733 | 2016-08-01 | 2589.44 | 6935550 |
| 2007-07-01 | 1999.59 | 5355709 | 2012-02-01 | 2081.45 | 5215285 | 2016-09-01 | 2651.88 | 6873680 |
| 2007-08-01 | 1857.81 | 4975954 | 2012-03-01 | 2076.06 | 5560519 | 2016-10-01 | 2694.90 | 7218030 |
| 2007-09-01 | 1704.31 | 4417563 | 2012-04-01 | 2077.21 | 5384140 | 2016-11-01 | 2459.80 | 6375790 |
| 2007-10-01 | 2009.80 | 5383061 | 2012-05-01 | 2211.20 | 5922491 | 2016-12-01 | 2077.05 | 5563160 |
| 2007-11-01 | 1909.74 | 4950040 | 2012-06-01 | 2266.68 | 5875227 | 2017-01-01 | 1995.86 | 5345720 |
| 2007-12-01 | 1875.77 | 5024070 | 2012-07-01 | 2299.44 | 6158818 | 2017-02-01 | 2296.99 | 5556870 |
| 2008-01-01 | 1883.08 | 5043649 | 2012-08-01 | 2358.32 | 6316527 | 2017-03-01 | 2297.71 | 6154196 |
| 2008-02-01 | 1911.20 | 4788696 | 2012-09-01 | 2272.84 | 5891191 | 2017-04-01 | 2516.11 | 6521762 |
| 2008-03-01 | 1799.65 | 4820186 | 2012-10-01 | 2205.98 | 5908506 | 2017-05-01 | 2636.63 | 7061949 |
| 2008-04-01 | 1850.00 | 4795209 | 2012-11-01 | 2125.99 | 5510565 | 2017-06-01 | 2706.70 | 7015763 |
| 2008-05-01 | 1908.01 | 5110403 | 2012-12-01 | 1995.76 | 5345440 | 2017-07-01 | 2520.90 | 6751971 |
| 2008-06-01 | 1982.40 | 5138391 | 2013-01-01 | 2037.91 | 5458334 | 2017-08-01 | 2501.38 | 6699703 |
| 2008-07-01 | 1992.42 | 5336503 | 2013-02-01 | 2188.64 | 5294763 | 2017-09-01 | 2382.26 | 6174809 |
| 2008-08-01 | 2070.78 | 5546383 | 2013-03-01 | 2143.50 | 5741158 | 2017-10-01 | 2660.20 | 7125073 |
| 2008-09-01 | 2182.36 | 5656665 | 2013-04-01 | 2247.90 | 5826548 | 2017-11-01 | 2538.78 | 6580506 |
| 2008-10-01 | 2163.11 | 5793677 | 2013-05-01 | 2217.26 | 5938722 | 2017-12-01 | 2360.34 | 6321927 |
| 2008-11-01 | 2080.71 | 5393188 | 2013-06-01 | 2265.98 | 5873420 | 2018-01-01 | 2368.32 | 6343300 |
| 2008-12-01 | 2050.03 | 5490805 | 2013-07-01 | 2241.24 | 6002924 | 2018-02-01 | 2615.04 | 6326295 |
| 2009-01-01 | 1558.05 | 4173073 | 2013-08-01 | 2517.44 | 6742718 | 2018-03-01 | 2832.06 | 7585385 |
| 2009-02-01 | 1399.98 | 3386842 | 2013-09-01 | 2660.40 | 6895756 | 2018-04-01 | 2523.61 | 6541189 |
| 2009-03-01 | 1744.37 | 4672120 | 2013-10-01 | 2582.85 | 6917898 | 2018-05-01 | 2663.47 | 7133845 |
| 2009-04-01 | 2013.27 | 5218396 | 2013-11-01 | 2530.44 | 6558893 | 2018-06-01 | 2612.51 | 6771630 |
| 2009-05-01 | 1902.54 | 5095773 | 2013-12-01 | 2263.97 | 6063830 | 2018-07-01 | 2745.51 | 7353579 |
| 2009-06-01 | 2035.47 | 5275938 | 2014-01-01 | 2180.19 | 5839410 | 2018-08-01 | 2428.95 | 6505688 |
| 2009-07-01 | 2086.91 | 5589584 | 2014-02-01 | 2243.87 | 5428376 | 2018-09-01 | 2687.51 | 6966031 |
| 2009-08-01 | 2116.12 | 5667807 | 2014-03-01 | 2251.68 | 6030897 | 2018-10-01 | 2564.88 | 6869788 |
| 2009-09-01 | 2161.53 | 5602686 | 2014-04-01 | 2264.01 | 5868320 | 2018-11-01 | 2416.59 | 6263796 |
| 2009-10-01 | 2057.86 | 5511769 | 2014-05-01 | 2194.45 | 5877626 | 2018-12-01 | 2414.84 | 6467896 |
| 2009-11-01 | 1986.67 | 5149441 | 2014-06-01 | 2342.92 | 6072850 | 2019-01-01 | 2498.91 | 6693092 |
| 2009-12-01 | 1901.71 | 5093538 | 2014-07-01 | 2364.91 | 6334188 | 2019-02-01 | 2432.25 | 5884096 |
| 2010-01-01 | 1908.99 | 5113051 | 2014-08-01 | 2325.20 | 6227822 | 2019-03-01 | 2529.05 | 6773809 |
| 2010-02-01 | 1879.59 | 4547103 | 2014-09-01 | 2531.67 | 6562086 | 2019-04-01 | 2254.06 | 5842532 |
| 2010-03-01 | 1884.29 | 5046876 | 2014-10-01 | 2558.14 | 6851726 | 2019-05-01 | 2505.72 | 6711309 |
| 2010-04-01 | 1563.40 | 4052330 | 2014-11-01 | 2493.15 | 6462235 | 2019-06-01 | 2660.40 | 6895770 |
| 2010-05-01 | 1544.79 | 4137577 | 2014-12-01 | 2449.63 | 6561079 | 2019-07-01 | 2671.55 | 7155480 |
| 2010-06-01 | 1622.52 | 4205570 | 2015-01-01 | 2474.59 | 6627935 | 2019-08-01 | 2638.98 | 7068236 |
| 2010-07-01 | 82.43   | 220781  | 2015-02-01 | 2506.75 | 6064333 | 2019-09-01 | 2695.05 | 6985581 |
| 2010-08-01 | 1129.93 | 3026400 | 2015-03-01 | 2397.35 | 6421053 | 2019-10-01 | 2634.33 | 7055783 |
| 2010-09-01 | 1601.40 | 4150834 | 2015-04-01 | 2427.61 | 6292357 | 2019-11-01 | 2605.42 | 6753253 |
| 2010-10-01 | 1578.54 | 4227970 | 2015-05-01 | 2547.84 | 6824133 | 2019-12-01 | 2507.82 | 6716956 |
| 2010-11-01 | 1766.66 | 4579171 | 2015-06-01 | 2528.99 | 6555135 | 2020-01-01 | 2539.43 | 6801618 |
| 2010-12-01 | 1779.94 | 4767404 | 2015-07-01 | 2388.25 | 6396702 | 2020-02-01 | 2198.29 | 5508044 |
| 2011-01-01 | 1983.72 | 5313202 | 2015-08-01 | 2405.73 | 6443518 | 2020-03-01 | 2441.59 | 6539547 |
| 2011-02-01 | 1969.07 | 4763578 | 2015-09-01 | 2369.36 | 6141385 | 2020-04-01 | 2454.62 | 6362368 |
| 2011-03-01 | 2046.16 | 5480430 | 2015-10-01 | 2296.23 | 6150231 | 2020-05-01 | 2623.29 | 7026228 |
| 2011-04-01 | 2056.56 | 5330598 | 2015-11-01 | 2126.52 | 5511938 | 2020-06-01 | 2659.82 | 6894255 |
| 2011-05-01 | 2160.87 | 5787685 | 2015-12-01 | 2269.66 | 6079062 | 2020-07-01 | 2663.58 | 7134125 |
| 2011-06-01 | 2195.75 | 5691385 | 2016-01-01 | 2358.46 | 6316895 | 2020-08-01 | 2465.74 | 6604233 |
| 2011-07-01 | 2242.29 | 6005759 | 2016-02-01 | 2238.70 | 5609281 | 2020-09-01 | 2466.31 | 6392678 |

Fuente: Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, 2020

**ANEXO 6. CANTIDAD DE ENERGÍA ELECTRICA USADA EN LA PLANTA “Dulces Nombres” EN N. L.**

| Fecha      | kWh/m3   | kwh/mes | Fecha      | kWh/m3   | kwh/mes | Fecha      | kWh/m3   | kwh/mes |
|------------|----------|---------|------------|----------|---------|------------|----------|---------|
| 2007-01-01 | 0.225018 | 3484970 | 2011-08-01 | 0.275904 | 3334134 | 2016-03-01 | 0.248041 | 4234600 |
| 2007-02-01 | 0.259093 | 3172649 | 2011-09-01 | 0.284675 | 3276357 | 2016-04-01 | 0.246279 | 4101188 |
| 2007-03-01 | 0.281356 | 3613066 | 2011-10-01 | 0.275978 | 3428916 | 2016-05-01 | 0.239004 | 4088248 |
| 2007-04-01 | 0.273953 | 3437671 | 2011-11-01 | 0.290715 | 3248807 | 2016-06-01 | 0.218976 | 3699512 |
| 2007-05-01 | 0.266661 | 3562962 | 2011-12-01 | 0.304657 | 3760563 | 2016-07-01 | 0.213195 | 3830040 |
| 2007-06-01 | 0.255244 | 3437833 | 2012-01-01 | 0.30521  | 3683330 | 2016-08-01 | 0.233336 | 4150288 |
| 2007-07-01 | 0.254283 | 3585207 | 2012-02-01 | 0.311034 | 3563954 | 2016-09-01 | 0.227569 | 3932672 |
| 2007-08-01 | 0.237345 | 3468040 | 2012-03-01 | 0.303446 | 3790680 | 2016-10-01 | 0.216561 | 4196721 |
| 2007-09-01 | 0.241662 | 3428940 | 2012-04-01 | 0.308065 | 3560255 | 2016-11-01 | 0.191157 | 4241484 |
| 2007-10-01 | 0.239473 | 3386299 | 2012-05-01 | 0.30505  | 3695245 | 2016-12-01 | 0.209702 | 4103846 |
| 2007-11-01 | 0.233118 | 2995066 | 2012-06-01 | 0.28865  | 3438339 | 2017-01-01 | 0.212604 | 3889600 |
| 2007-12-01 | 0.266785 | 3566069 | 2012-07-01 | 0.285813 | 3481654 | 2017-02-01 | 0.220879 | 3738136 |
| 2008-01-01 | 0.281996 | 3757053 | 2012-08-01 | 0.287025 | 3542219 | 2017-03-01 | 0.240467 | 4514352 |
| 2008-02-01 | 0.282233 | 3451175 | 2012-09-01 | 0.290193 | 3514699 | 2017-04-01 | 0.233588 | 4352312 |
| 2008-03-01 | 0.302914 | 3815562 | 2012-10-01 | 0.267568 | 3548382 | 2017-05-01 | 0.223233 | 4386840 |
| 2008-04-01 | 0.26282  | 3344691 | 2012-11-01 | 0.267307 | 3563731 | 2017-06-01 | 0.236646 | 4389456 |
| 2008-05-01 | 0.233735 | 3184522 | 2012-12-01 | 0.262258 | 3507703 | 2017-07-01 | 0.237102 | 4474800 |
| 2008-06-01 | 0.257131 | 3206550 | 2013-01-01 | 0.272434 | 3611444 | 2017-08-01 | 0.22232  | 4222552 |
| 2008-07-01 | 0.258882 | 3604628 | 2013-02-01 | 0.285934 | 3379856 | 2017-09-01 | 0.241547 | 4118640 |
| 2008-08-01 | 0.239043 | 3455909 | 2013-03-01 | 0.286463 | 3669019 | 2017-10-01 | 0.218939 | 4092832 |
| 2008-09-01 | 0.23668  | 3294804 | 2013-04-01 | 0.299315 | 3623073 | 2017-11-01 | 0.227382 | 4232832 |
| 2008-10-01 | 0.245175 | 3528247 | 2013-05-01 | 0.306467 | 3944265 | 2017-12-01 | 0.23644  | 4487462 |
| 2008-11-01 | 0.256704 | 3328023 | 2013-06-01 | 0.316222 | 3928990 | 2018-01-01 | 0.243963 | 4465322 |
| 2008-12-01 | 0.257803 | 3469391 | 2013-07-01 | 0.291149 | 3727464 | 2018-02-01 | 0.245916 | 3927072 |
| 2009-01-01 | 0.351164 | 3271459 | 2013-08-01 | 0.308019 | 4157456 | 2018-03-01 | 0.262251 | 4702912 |
| 2009-02-01 | 0.336502 | 3118277 | 2013-09-01 | 0.272212 | 3937817 | 2018-04-01 | 0.253857 | 4539152 |
| 2009-03-01 | 0.275484 | 3236857 | 2013-10-01 | 0.238584 | 3870889 | 2018-05-01 | 0.245884 | 4598256 |
| 2009-04-01 | 0.238006 | 2840152 | 2013-11-01 | 0.252382 | 4040744 | 2018-06-01 | 0.236799 | 4215824 |
| 2009-05-01 | 0.267619 | 3269909 | 2013-12-01 | 0.245285 | 4014480 | 2018-07-01 | 0.22439  | 4586040 |
| 2009-06-01 | 0.293713 | 3510237 | 2014-01-01 | 0.246306 | 4107003 | 2018-08-01 | 0.230165 | 4491216 |
| 2009-07-01 | 0.283927 | 3480000 | 2014-02-01 | 0.232105 | 3404102 | 2018-09-01 | 0.239248 | 4517120 |
| 2009-08-01 | 0.272181 | 3270973 | 2014-03-01 | 0.24085  | 3925134 | 2018-10-01 | 0.238898 | 4543760 |
| 2009-09-01 | 0.282137 | 3266575 | 2014-04-01 | 0.265567 | 4095520 | 2018-11-01 | 0.201483 | 3993024 |
| 2009-10-01 | 0.287936 | 3372925 | 2014-05-01 | 0.258341 | 4242108 | 2018-12-01 | 0.230465 | 4688304 |
| 2009-11-01 | 0.27645  | 3286404 | 2014-06-01 | 0.248779 | 3931998 | 2019-01-01 | 0.230644 | 4746816 |
| 2009-12-01 | 0.280921 | 3359940 | 2014-07-01 | 0.236219 | 3880132 | 2019-02-01 | 0.224309 | 3948864 |
| 2010-01-01 | 0.305989 | 3409089 | 2014-08-01 | 0.234238 | 3837476 | 2019-03-01 | 0.234208 | 4332736 |
| 2010-02-01 | 0.29645  | 3059250 | 2014-09-01 | 0.227407 | 3670356 | 2019-04-01 | 0.245247 | 4282032 |
| 2010-03-01 | 0.29104  | 3316336 | 2014-10-01 | 0.239516 | 3980896 | 2019-05-01 | 0.240814 | 4525432 |
| 2010-04-01 | 0.32102  | 3152955 | 2014-11-01 | 0.250458 | 3953624 | 2019-06-01 | 0.248038 | 4507272 |
| 2010-05-01 | 0.322257 | 3322396 | 2014-12-01 | 0.247983 | 4121048 | 2019-07-01 | 0.250487 | 4770448 |
| 2010-06-01 | 0.328265 | 3152136 | 2015-01-01 | 0.248777 | 4106029 | 2019-08-01 | 0.23843  | 4479104 |
| 2010-07-01 | 0.262289 | 3199343 | 2015-02-01 | 0.240135 | 3560509 | 2019-09-01 | 0.231498 | 4416528 |
| 2010-08-01 | 0.254901 | 3103286 | 2015-03-01 | 0.235365 | 3906498 | 2019-10-01 | 0.254781 | 4590464 |
| 2010-09-01 | 0.241745 | 2835541 | 2015-04-01 | 0.234688 | 3775630 | 2019-11-01 | 0.249605 | 4476160 |
| 2010-10-01 | 0.201294 | 2439371 | 2015-05-01 | 0.233068 | 3955484 | 2019-12-01 | 0.257058 | 4631232 |
| 2010-11-01 | 0.253393 | 2973209 | 2015-06-01 | 0.231718 | 3737910 | 2020-01-01 | 0.253772 | 4532048 |
| 2010-12-01 | 0.256592 | 3013467 | 2015-07-01 | 0.228979 | 3777282 | 2020-02-01 | 0.256483 | 4086496 |
| 2011-01-01 | 0.279857 | 3208072 | 2015-08-01 | 0.228622 | 3810906 | 2020-03-01 | 0.238782 | 4428768 |
| 2011-02-01 | 0.277837 | 2976584 | 2015-09-01 | 0.228838 | 3591112 | 2020-04-01 | 0.232548 | 3959472 |
| 2011-03-01 | 0.270623 | 3244008 | 2015-10-01 | 0.21077  | 3762812 | 2020-05-01 | 0.23963  | 4188480 |
| 2011-04-01 | 0.270054 | 3106000 | 2015-11-01 | 0.225255 | 3854960 | 2020-06-01 | 0.22848  | 4089025 |
| 2011-05-01 | 0.26681  | 3245855 | 2015-12-01 | 0.238064 | 4005484 | 2020-07-01 | 0.207362 | 3977568 |
| 2011-06-01 | 0.269563 | 3181135 | 2016-01-01 | 0.245727 | 4090105 | 2020-08-01 | 0.210798 | 3941984 |
| 2011-07-01 | 0.262491 | 3197561 | 2016-02-01 | 0.260302 | 3944312 | 2020-09-01 | 0.21483  | 4056416 |

Fuente: Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, 2020



**ANEXO 7. CANTIDAD DE ENERGÍA ELECTRICA USADA EN LA PLANTA “Norte” EN N. L.**

| Fecha      | kWh/m3   | kwh/mes | Fecha      | kWh/m3   | kwh/mes | Fecha      | kWh/m3   | kwh/mes |
|------------|----------|---------|------------|----------|---------|------------|----------|---------|
| 2007-01-01 | 0.255825 | 1474734 | 2011-08-01 | 0.286944 | 1765776 | 2016-03-01 | 0.277985 | 1607008 |
| 2007-02-01 | 0.292668 | 1488329 | 2011-09-01 | 0.329903 | 1953464 | 2016-04-01 | 0.276244 | 1520640 |
| 2007-03-01 | 0.347364 | 1665112 | 2011-10-01 | 0.276678 | 1617232 | 2016-05-01 | 0.280322 | 1582912 |
| 2007-04-01 | 0.297328 | 1328932 | 2011-11-01 | 0.275944 | 1486088 | 2016-06-01 | 0.270988 | 1437152 |
| 2007-05-01 | 0.320164 | 1677267 | 2011-12-01 | 0.291812 | 1646080 | 2016-07-01 | 0.274204 | 1574176 |
| 2007-06-01 | 0.272575 | 1617478 | 2012-01-01 | 0.30591  | 1625216 | 2016-08-01 | 0.281092 | 1949530 |
| 2007-07-01 | 0.305879 | 1638201 | 2012-02-01 | 0.290288 | 1513935 | 2016-09-01 | 0.283945 | 1951744 |
| 2007-08-01 | 0.31301  | 1557521 | 2012-03-01 | 0.333672 | 1855392 | 2016-10-01 | 0.291381 | 2103200 |
| 2007-09-01 | 0.326055 | 1440370 | 2012-04-01 | 0.337552 | 1817425 | 2016-11-01 | 0.309124 | 1970912 |
| 2007-10-01 | 0.31623  | 1702284 | 2012-05-01 | 0.284645 | 1685807 | 2016-12-01 | 0.35136  | 1954672 |
| 2007-11-01 | 0.331291 | 1639905 | 2012-06-01 | 0.272183 | 1599136 | 2017-01-01 | 0.37543  | 2006944 |
| 2007-12-01 | 0.31731  | 1594186 | 2012-07-01 | 0.260964 | 1607232 | 2017-02-01 | 0.327652 | 1820720 |
| 2008-01-01 | 0.385493 | 1944293 | 2012-08-01 | 0.264709 | 1672042 | 2017-03-01 | 0.32527  | 2001776 |
| 2008-02-01 | 0.368226 | 1763322 | 2012-09-01 | 0.27465  | 1618016 | 2017-04-01 | 0.316384 | 2063384 |
| 2008-03-01 | 0.388373 | 1872028 | 2012-10-01 | 0.277734 | 1640992 | 2017-05-01 | 0.358695 | 2533084 |
| 2008-04-01 | 0.396215 | 1899935 | 2012-11-01 | 0.297453 | 1639136 | 2017-06-01 | 0.350469 | 2458808 |
| 2008-05-01 | 0.378696 | 1935287 | 2012-12-01 | 0.325771 | 1741392 | 2017-07-01 | 0.35892  | 2423416 |
| 2008-06-01 | 0.311961 | 1602976 | 2013-01-01 | 0.313502 | 1711200 | 2017-08-01 | 0.305011 | 2043486 |
| 2008-07-01 | 0.269856 | 1440085 | 2013-02-01 | 0.297187 | 1573536 | 2017-09-01 | 0.342823 | 2116864 |
| 2008-08-01 | 0.279812 | 1551945 | 2013-03-01 | 0.332975 | 1911664 | 2017-10-01 | 0.320706 | 2285056 |
| 2008-09-01 | 0.249926 | 1413747 | 2013-04-01 | 0.320238 | 1865884 | 2017-11-01 | 0.354815 | 2334864 |
| 2008-10-01 | 0.249088 | 1443136 | 2013-05-01 | 0.291055 | 1728496 | 2017-12-01 | 0.367103 | 2320800 |
| 2008-11-01 | 0.274933 | 1482768 | 2013-06-01 | 0.286694 | 1683872 | 2018-01-01 | 0.322633 | 2046555 |
| 2008-12-01 | 0.27973  | 1535945 | 2013-07-01 | 0.276614 | 1660492 | 2018-02-01 | 0.330323 | 2089721 |
| 2009-01-01 | 0.381477 | 1591933 | 2013-08-01 | 0.245595 | 1655977 | 2018-03-01 | 0.322451 | 2445912 |
| 2009-02-01 | 0.434664 | 1472138 | 2013-09-01 | 0.227888 | 1571460 | 2018-04-01 | 0.327334 | 2141152 |
| 2009-03-01 | 0.361616 | 1689512 | 2013-10-01 | 0.230475 | 1594404 | 2018-05-01 | 0.304159 | 2169824 |
| 2009-04-01 | 0.304529 | 1589151 | 2013-11-01 | 0.243736 | 1598640 | 2018-06-01 | 0.28881  | 1955712 |
| 2009-05-01 | 0.331853 | 1691048 | 2013-12-01 | 0.261773 | 1587344 | 2018-07-01 | 0.29175  | 2145408 |
| 2009-06-01 | 0.300701 | 1586480 | 2014-01-01 | 0.265597 | 1550928 | 2018-08-01 | 0.329548 | 2143936 |
| 2009-07-01 | 0.301515 | 1685344 | 2014-02-01 | 0.284773 | 1545856 | 2018-09-01 | 0.301325 | 2099040 |
| 2009-08-01 | 0.328995 | 1864680 | 2014-03-01 | 0.271058 | 1634720 | 2018-10-01 | 0.305328 | 2097536 |
| 2009-09-01 | 0.339648 | 1902939 | 2014-04-01 | 0.267462 | 1569552 | 2018-11-01 | 0.334904 | 2097770 |
| 2009-10-01 | 0.377215 | 2079120 | 2014-05-01 | 0.27254  | 1601888 | 2018-12-01 | 0.320497 | 2072942 |
| 2009-11-01 | 0.41738  | 2149276 | 2014-06-01 | 0.271709 | 1650051 | 2019-01-01 | 0.323476 | 2165056 |
| 2009-12-01 | 0.377609 | 1923368 | 2014-07-01 | 0.260964 | 1652992 | 2019-02-01 | 0.331762 | 1952122 |
| 2010-01-01 | 0.376386 | 1924480 | 2014-08-01 | 0.27963  | 1741488 | 2019-03-01 | 0.333985 | 2262354 |
| 2010-02-01 | 0.439499 | 1998448 | 2014-09-01 | 0.254948 | 1672992 | 2019-04-01 | 0.333457 | 1948233 |
| 2010-03-01 | 0.419022 | 2114750 | 2014-10-01 | 0.249929 | 1712448 | 2019-05-01 | 0.332399 | 2230832 |
| 2010-04-01 | 0.438675 | 1777656 | 2014-11-01 | 0.25907  | 1674168 | 2019-06-01 | 0.319908 | 2206013 |
| 2010-05-01 | 0.457804 | 1894200 | 2014-12-01 | 0.255168 | 1674180 | 2019-07-01 | 0.328612 | 2351375 |
| 2010-06-01 | 0.459695 | 1933280 | 2015-01-01 | 0.249398 | 1652992 | 2019-08-01 | 0.334683 | 2365618 |
| 2010-07-01 | 1.340002 | 295847  | 2015-02-01 | 0.246411 | 1494320 | 2019-09-01 | 0.300594 | 2099822 |
| 2010-08-01 | 0.415972 | 1258899 | 2015-03-01 | 0.250601 | 1609120 | 2019-10-01 | 0.301029 | 2123997 |
| 2010-09-01 | 0.361459 | 1500356 | 2015-04-01 | 0.249623 | 1570720 | 2019-11-01 | 0.303863 | 2052065 |
| 2010-10-01 | 0.325296 | 1375341 | 2015-05-01 | 0.243436 | 1661239 | 2019-12-01 | 0.329471 | 2213042 |
| 2010-11-01 | 0.299995 | 1373728 | 2015-06-01 | 0.254848 | 1670560 | 2020-01-01 | 0.325541 | 2214204 |
| 2010-12-01 | 0.314365 | 1498704 | 2015-07-01 | 0.268533 | 1717728 | 2020-02-01 | 0.391842 | 2158282 |
| 2011-01-01 | 0.349341 | 1856120 | 2015-08-01 | 0.258656 | 1666656 | 2020-03-01 | 0.359215 | 2349102 |
| 2011-02-01 | 0.372896 | 1776320 | 2015-09-01 | 0.2622   | 1610272 | 2020-04-01 | 0.349432 | 2223212 |
| 2011-03-01 | 0.37687  | 2065408 | 2015-10-01 | 0.274619 | 1688968 | 2020-05-01 | 0.332614 | 2337024 |
| 2011-04-01 | 0.407234 | 2170800 | 2015-11-01 | 0.276955 | 1526560 | 2020-06-01 | 0.326005 | 2247560 |
| 2011-05-01 | 0.395621 | 2289728 | 2015-12-01 | 0.267873 | 1628416 | 2020-07-01 | 0.320706 | 2287960 |
| 2011-06-01 | 0.349693 | 1990240 | 2016-01-01 | 0.265381 | 1676384 | 2020-08-01 | 0.347323 | 2293804 |
| 2011-07-01 | 0.295434 | 1774304 | 2016-02-01 | 0.282729 | 1585904 | 2020-09-01 | 0.320882 | 2051296 |

Fuente: Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, 2020

## ANEXO 8. CÁLCULO DE BIOGÁS GENERADO EN PTAR “DULCES NOMBRES”

| Planta DN  | m3/mes  | Planta DN  | m3/mes  | Planta DN  | m3/mes  |
|------------|---------|------------|---------|------------|---------|
| 2007-01-01 | 3319363 | 2011-08-01 | 3378367 | 2016-03-01 | 5997928 |
| 2007-02-01 | 4162925 | 2011-09-01 | 3364731 | 2016-04-01 | 5731668 |
| 2007-03-01 | 3416618 | 2011-10-01 | 3530780 | 2016-05-01 | 5177186 |
| 2007-04-01 | 4286167 | 2011-11-01 | 3717377 | 2016-06-01 | 5480715 |
| 2007-05-01 | 3504064 | 2011-12-01 | 4304308 | 2016-07-01 | 6366332 |
| 2007-06-01 | 2557784 | 2012-01-01 | 4310067 | 2016-08-01 | 5436119 |
| 2007-07-01 | 2822490 | 2012-02-01 | 3836867 | 2016-09-01 | 5200305 |
| 2007-08-01 | 3756142 | 2012-03-01 | 5191837 | 2016-10-01 | 5502057 |
| 2007-09-01 | 2544095 | 2012-04-01 | 4570419 | 2016-11-01 | 5620187 |
| 2007-10-01 | 4262045 | 2012-05-01 | 4678032 | 2016-12-01 | 6284943 |
| 2007-11-01 | 2794898 | 2012-06-01 | 4191840 | 2017-01-01 | 5268279 |
| 2007-12-01 | 5252937 | 2012-07-01 | 3882661 | 2017-02-01 | 5066348 |
| 2008-01-01 | 3883349 | 2012-08-01 | 4089794 | 2017-03-01 | 5825404 |
| 2008-02-01 | 3930403 | 2012-09-01 | 3744957 | 2017-04-01 | 5928865 |
| 2008-03-01 | 4179845 | 2012-10-01 | 4708419 | 2017-05-01 | 6577312 |
| 2008-04-01 | 4647040 | 2012-11-01 | 4320928 | 2017-06-01 | 6315475 |
| 2008-05-01 | 3955450 | 2012-12-01 | 4731429 | 2017-07-01 | 6392766 |
| 2008-06-01 | 3763475 | 2013-01-01 | 4773999 | 2017-08-01 | 6491572 |
| 2008-07-01 | 4442929 | 2013-02-01 | 4854876 | 2017-09-01 | 5639982 |
| 2008-08-01 | 4391137 | 2013-03-01 | 4964734 | 2017-10-01 | 4322629 |
| 2008-09-01 | 3112772 | 2013-04-01 | 4359792 | 2017-11-01 | 5545493 |
| 2008-10-01 | 3355699 | 2013-05-01 | 3851750 | 2017-12-01 | 5877475 |
| 2008-11-01 | 3277252 | 2013-06-01 | 4179401 | 2018-01-01 | 5668132 |
| 2008-12-01 | 3768004 | 2013-07-01 | 4215400 | 2018-02-01 | 5787675 |
| 2009-01-01 | 2875084 | 2013-08-01 | 4344084 | 2018-03-01 | 6770955 |
| 2009-02-01 | 2664401 | 2013-09-01 | 3098489 | 2018-04-01 | 6466418 |
| 2009-03-01 | 3716930 | 2013-10-01 | 4941374 | 2018-05-01 | 6348403 |
| 2009-04-01 | 3774949 | 2013-11-01 | 3918761 | 2018-06-01 | 5577244 |
| 2009-05-01 | 3701994 | 2013-12-01 | 4794920 | 2018-07-01 | 6311612 |
| 2009-06-01 | 3630958 | 2014-01-01 | 4102529 | 2018-08-01 | 5959941 |
| 2009-07-01 | 3520621 | 2014-02-01 | 4646239 | 2018-09-01 | 4968222 |
| 2009-08-01 | 3418975 | 2014-03-01 | 5052442 | 2018-10-01 | 4410336 |
| 2009-09-01 | 3293892 | 2014-04-01 | 4438422 | 2018-11-01 | 5366013 |
| 2009-10-01 | 3495957 | 2014-05-01 | 4874896 | 2018-12-01 | 5875298 |
| 2009-11-01 | 3896647 | 2014-06-01 | 4882523 | 2019-01-01 | 6227533 |
| 2009-12-01 | 3267697 | 2014-07-01 | 4902930 | 2019-02-01 | 5634707 |
| 2010-01-01 | 3609805 | 2014-08-01 | 5090954 | 2019-03-01 | 6269368 |
| 2010-02-01 | 3214803 | 2014-09-01 | 4485645 | 2019-04-01 | 5688930 |
| 2010-03-01 | 3530548 | 2014-10-01 | 4393298 | 2019-05-01 | 6119975 |
| 2010-04-01 | 2630234 | 2014-11-01 | 4591850 | 2019-06-01 | 5600621 |
| 2010-05-01 | 2945989 | 2014-12-01 | 4877745 | 2019-07-01 | 6475828 |
| 2010-06-01 | 2756310 | 2015-01-01 | 5129252 | 2019-08-01 | 6520708 |
| 2010-07-01 | 2787078 | 2015-02-01 | 4202592 | 2019-09-01 | 5571418 |
| 2010-08-01 | 3355277 | 2015-03-01 | 4783050 | 2019-10-01 | 5432720 |
| 2010-09-01 | 2474512 | 2015-04-01 | 4255042 | 2019-11-01 | 5447389 |
| 2010-10-01 | 2945642 | 2015-05-01 | 4489485 | 2019-12-01 | 5688768 |
| 2010-11-01 | 3212657 | 2015-06-01 | 4063876 | 2020-01-01 | 6378564 |
| 2010-12-01 | 3193534 | 2015-07-01 | 4702105 | 2020-02-01 | 5528743 |
| 2011-01-01 | 3994569 | 2015-08-01 | 4694502 | 2020-03-01 | 6486446 |
| 2011-02-01 | 3709767 | 2015-09-01 | 3508227 | 2020-04-01 | 5305834 |
| 2011-03-01 | 3673664 | 2015-10-01 | 3996608 | 2020-05-01 | 5551858 |
| 2011-04-01 | 3626163 | 2015-11-01 | 4350892 | 2020-06-01 | 4934807 |
| 2011-05-01 | 3079746 | 2015-12-01 | 5159961 | 2020-07-01 | 5769631 |
| 2011-06-01 | 3133465 | 2016-01-01 | 5982007 | 2020-08-01 | 4392971 |
| 2011-07-01 | 3261897 | 2016-02-01 | 5609512 | 2020-09-01 | 4264803 |

## ANEXO 9. CÁLCULO DE BIOGÁS GENERADO EN PTAR “NORTE”

| Planta N   | m3/mes   | Planta N   | m3/mes  | Planta N   | m3/mes  |
|------------|----------|------------|---------|------------|---------|
| 2007-01-01 | 1415178  | 2011-08-01 | 1465281 | 2016-03-01 | 1647491 |
| 2007-02-01 | 1857936  | 2011-09-01 | 1648675 | 2016-04-01 | 1622271 |
| 2007-03-01 | 1608075  | 2011-10-01 | 1602548 | 2016-05-01 | 1536846 |
| 2007-04-01 | 1258111  | 2011-11-01 | 1940515 | 2016-06-01 | 1274027 |
| 2007-05-01 | 1134585  | 2011-12-01 | 1877097 | 2016-07-01 | 1605887 |
| 2007-06-01 | 1275631  | 2012-01-01 | 1751509 | 2016-08-01 | 2009541 |
| 2007-07-01 | 1122049  | 2012-02-01 | 1654026 | 2016-09-01 | 2034211 |
| 2007-08-01 | 1330291  | 2012-03-01 | 1684453 | 2016-10-01 | 2187323 |
| 2007-09-01 | 1423740  | 2012-04-01 | 1863140 | 2016-11-01 | 1873455 |
| 2007-10-01 | 563889.5 | 2012-05-01 | 1718020 | 2016-12-01 | 1886736 |
| 2007-11-01 | 1530139  | 2012-06-01 | 2044417 | 2017-01-01 | 1856463 |
| 2007-12-01 | 1549794  | 2012-07-01 | 1938349 | 2017-02-01 | 2149829 |
| 2008-01-01 | 1341745  | 2012-08-01 | 2112452 | 2017-03-01 | 1985419 |
| 2008-02-01 | 1433333  | 2012-09-01 | 1603054 | 2017-04-01 | 2045894 |
| 2008-03-01 | 1606163  | 2012-10-01 | 1826281 | 2017-05-01 | 2374450 |
| 2008-04-01 | 1479351  | 2012-11-01 | 1415588 | 2017-06-01 | 2659964 |
| 2008-05-01 | 1060803  | 2012-12-01 | 1345376 | 2017-07-01 | 2504430 |
| 2008-06-01 | 1475261  | 2013-01-01 | 1579193 | 2017-08-01 | 2384303 |
| 2008-07-01 | 1376954  | 2013-02-01 | 1444755 | 2017-09-01 | 1841885 |
| 2008-08-01 | 1632497  | 2013-03-01 | 1709951 | 2017-10-01 | 2026188 |
| 2008-09-01 | 1552264  | 2013-04-01 | 1948556 | 2017-11-01 | 2321186 |
| 2008-10-01 | 1390663  | 2013-05-01 | 1908712 | 2017-12-01 | 2116894 |
| 2008-11-01 | 1236479  | 2013-06-01 | 2068658 | 2018-01-01 | 2154298 |
| 2008-12-01 | 1372659  | 2013-07-01 | 2098920 | 2018-02-01 | 2331632 |
| 2009-01-01 | 1026341  | 2013-08-01 | 2092118 | 2018-03-01 | 3011732 |
| 2009-02-01 | 930591.3 | 2013-09-01 | 2169260 | 2018-04-01 | 2205660 |
| 2009-03-01 | 1107943  | 2013-10-01 | 2303615 | 2018-05-01 | 2482910 |
| 2009-04-01 | 1374985  | 2013-11-01 | 1837958 | 2018-06-01 | 2337611 |
| 2009-05-01 | 1411447  | 2013-12-01 | 2064244 | 2018-07-01 | 2449603 |
| 2009-06-01 | 1139886  | 2014-01-01 | 1860916 | 2018-08-01 | 2356687 |
| 2009-07-01 | 971681.4 | 2014-02-01 | 2059364 | 2018-09-01 | 2285006 |
| 2009-08-01 | 1196541  | 2014-03-01 | 2162846 | 2018-10-01 | 2519486 |
| 2009-09-01 | 1033909  | 2014-04-01 | 1952275 | 2018-11-01 | 2312074 |
| 2009-10-01 | 1465746  | 2014-05-01 | 1889511 | 2018-12-01 | 2616213 |
| 2009-11-01 | 1669877  | 2014-06-01 | 2116749 | 2019-01-01 | 2521082 |
| 2009-12-01 | 1062867  | 2014-07-01 | 2349884 | 2019-02-01 | 2358929 |
| 2010-01-01 | 1219077  | 2014-08-01 | 2206671 | 2019-03-01 | 2564950 |
| 2010-02-01 | 1708963  | 2014-09-01 | 1864142 | 2019-04-01 | 2390978 |
| 2010-03-01 | 1304771  | 2014-10-01 | 2373372 | 2019-05-01 | 2388102 |
| 2010-04-01 | 1088032  | 2014-11-01 | 1784083 | 2019-06-01 | 2337111 |
| 2010-05-01 | 1324469  | 2014-12-01 | 2009515 | 2019-07-01 | 2715576 |
| 2010-06-01 | 1129750  | 2015-01-01 | 2059617 | 2019-08-01 | 3353710 |
| 2010-07-01 | 59308.78 | 2015-02-01 | 1892655 | 2019-09-01 | 3373343 |
| 2010-08-01 | 924651   | 2015-03-01 | 1916094 | 2019-10-01 | 3008069 |
| 2010-09-01 | 1054195  | 2015-04-01 | 1519461 | 2019-11-01 | 2476334 |
| 2010-10-01 | 1174702  | 2015-05-01 | 1915939 | 2019-12-01 | 2477233 |
| 2010-11-01 | 1386216  | 2015-06-01 | 1296372 | 2020-01-01 | 2532708 |
| 2010-12-01 | 1145454  | 2015-07-01 | 2123555 | 2020-02-01 | 2026516 |
| 2011-01-01 | 1620740  | 2015-08-01 | 1943699 | 2020-03-01 | 2533419 |
| 2011-02-01 | 1557077  | 2015-09-01 | 1587923 | 2020-04-01 | 2327754 |
| 2011-03-01 | 1616647  | 2015-10-01 | 1492817 | 2020-05-01 | 2460911 |
| 2011-04-01 | 1723856  | 2015-11-01 | 1686120 | 2020-06-01 | 2159650 |
| 2011-05-01 | 1839854  | 2015-12-01 | 1851140 | 2020-07-01 | 2445976 |
| 2011-06-01 | 1919110  | 2016-01-01 | 1889733 | 2020-08-01 | 2146114 |
| 2011-07-01 | 1768599  | 2016-02-01 | 1401977 | 2020-09-01 | 2045752 |

**ANEXO 10. PRODUCCIÓN DE GAS REAL EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, NUEVO LEÓN.**

| "Dulces Nombres" |                                            |                                         | "Norte" |                                            |                                         |
|------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|---------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Fecha            | Cantidad de Biogás<br>m <sup>3</sup> /hora | Poder Calorífico<br>Kcal/m <sup>3</sup> | Fecha   | Cantidad de Biogás<br>m <sup>3</sup> /hora | Poder Calorífico<br>Kcal/m <sup>3</sup> |
| 2009-12          | 2,275                                      | 5,435.70                                | 2009-12 | 834.5                                      | 5533.60                                 |
| 2012-10          | 1,994                                      | 5,706.92                                | 2012-10 | 756.76                                     | 6,046.13                                |
| 2014-12          | 1,191                                      | 5,676.00                                |         |                                            |                                         |

*Fuente: Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, 2020*

## ANEXO 11. RESULTADOS MÉTODO ETS

### SCRIPT

```
### ETS BIOGAS
fit.ets.biogas<-ets(biogas)
autoplot(biogas, col="gray", series="Biogás") + autolayer(fit.ets.biogas$fitted,
series="ETS") + autolayer(forecast(fit.ets.biogas,h=24)) +
theme_bw()+xlab("")+ylab("Biogás, MMm3/mes")
accuracy(fit.ets.biogas)
checkresiduals(fit.ets.biogas)

### ETS ENERGÍA ELÉCTRICA
fit.ets.ee<-ets(ee)
autoplot(ee, series="Energía Eléctrica", col="gray") +
autolayer(fit.ets.ee$fitted, series="ETS") + autolayer(forecast(fit.ets.ee,h=24))
+ theme_bw()+xlab("")+ylab("Energía Eléctrica, GWh/mes")
accuracy(fit.ets.ee)
checkresiduals(fit.ets.ee)

### ETS GASTO
fit.ets.gasto<-ets(gasto)
autoplot(gasto, series="Gasto", col="gray") + autolayer(fit.ets.gasto$fitted,
series="ETS") + autolayer(forecast(fit.ets.gasto,h=24)) +
theme_bw()+xlab("")+ylab("Gasto, MMm3G/mes")
accuracy(fit.ets.gasto)
checkresiduals(fit.ets.gasto)

### ETS TEMPERATURA
fit.ets.temp<-ets(temp)
autoplot(temp, series="Temperatura", col="gray") + autolayer(fit.ets.temp$fitted,
series="ETS") + autolayer(forecast(fit.ets.temp,h=24)) +
theme_bw()+xlab("")+ylab("Temperatura, °C")
accuracy(fit.ets.temp)
checkresiduals(fit.ets.temp)
```

### PLANTA "DULCES NOMBRES"

#### BIOGÁS

```
ETS(A,N,A)
Call: ets(y = biogas)
Smoothing parameters:      alpha = 0.4038
                           gamma = 1e-04
Initial states:           l = 3.6742
                           s = 0.3235 -0.2598 -0.3513 -0.6568 0.0979 0.0983 -0.1319
                           0.0464 0.2051 0.4518 0.0192 0.1577
sigma: 0.4971
AIC=627.2096      AICc=630.4311      BIC=673.7988
```

#### ENERGÍA ELÉCTRICA

```
ETS(A,N,A)
Call: ets(y = ee)
Smoothing parameters:      alpha = 0.4459
                           gamma = 1e-04
Initial states:           l = 3.4211
                           s = 0.1243 -0.0512 -0.0375 -0.0868 0.0066 0.0212
                           -0.0554 0.0937 -0.0591 0.1558 -0.2356 0.124
sigma: 0.1828
AIC=297.0265      AICc=300.2480      BIC=343.6157
```

**GASTO**

ETS(A,N,A)

Call: ets(y = gasto)

Smoothing parameters: alpha = 0.6387  
gamma = 1e-04

Initial states: l = 13.7877  
s = 0.6241 0.521 0.7359 -0.0436 0.4082 0.4362  
-0.4759 0.0241 -0.7011 -0.0807 -1.5025 0.0543

sigma: 0.7716  
AIC=772.2773 AICC=775.4988 BIC=818.8665

**TEMPERATURA**

ETS(A,N,A)

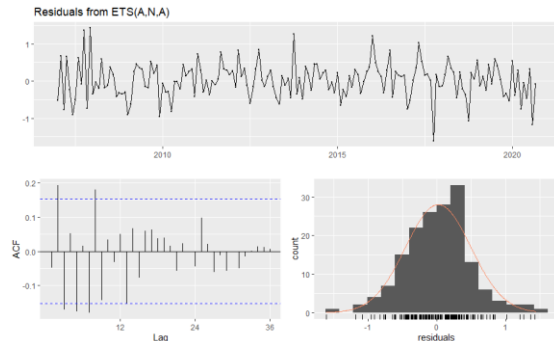
Call: ets(y = temp)

smoothing parameters: alpha = 0.3782  
gamma = 3e-04

Initial states: l = 22.0652  
s = -6.9101 -3.9891 0.5493 3.4337 6.1877 5.5364  
5.3995 3.8287 1.1901 -1.9726 -5.1621 -8.0916

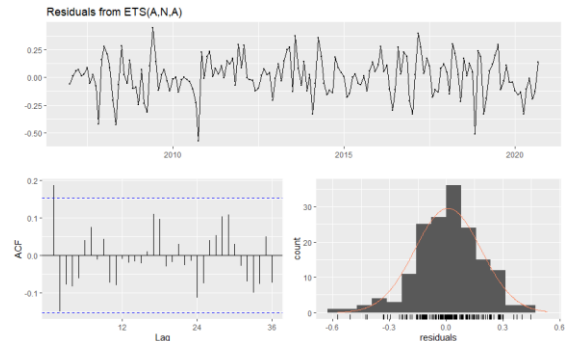
sigma: 1.1469  
AIC=903.0897 AICC=906.3111 BIC=949.6788

**BIOGAS**



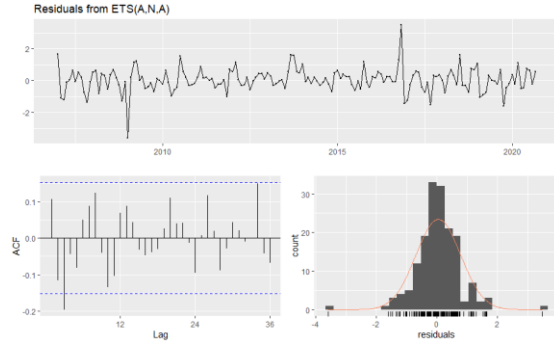
Ljung-Box test  
data: Residuals from ETS(A,N,A)  
Q\* = 42.545, df = 10, p-value = 5.997e-06  
Model df: 14. Total lags used: 24

**ENERGÍA ELÉCTRICA**



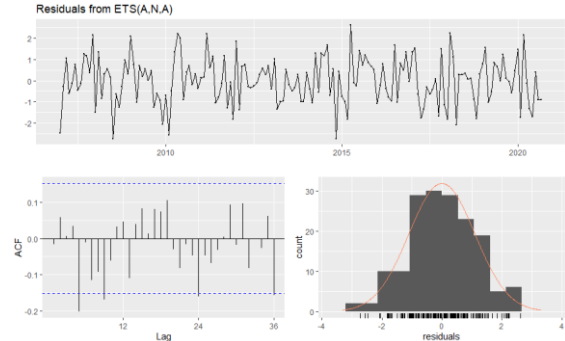
Ljung-Box test  
data: Residuals from ETS(A,N,A)  
Q\* = 23.452, df = 10, p-value = 0.009196  
Model df: 14. Total lags used: 24

**GASTO**



Ljung-Box test  
data: Residuals from ETS(A,N,A)  
Q\* = 30.582, df = 10, p-value = 0.0006875  
Model df: 14. Total lags used: 24

**TEMPERATURA**



Ljung-Box test  
data: Residuals from ETS(A,N,A)  
Q\* = 33.189, df = 10, p-value = 0.0002532  
Model df: 14. Total lags used: 24

**PLANTA "NORTE"**

**BIOGÁS**

ETS(A,N,N)  
 Call: ets(y = biogas)  
 smoothing parameters: alpha = 0.4295  
 Initial states: l = 1.5145  
 sigma: 0.2791  
 AIC=425.3031 AICc=425.4522 BIC=434.6209

**ENERGÍA ELÉCTRICA**

ETS(M,N,N)  
 Call: ets(y = ee)  
 Smoothing parameters: alpha = 0.4678  
 Initial states: l = 1.4937  
 sigma: 0.108  
 AIC=303.6929 AICc=303.8420 BIC=313.0108

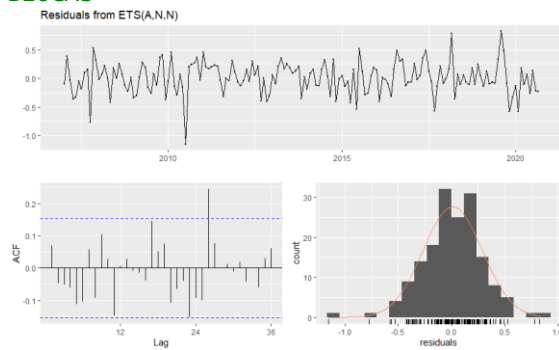
**GASTO**

ETS(A,N,A)  
 Call: ets(y = gasto)  
 Smoothing parameters: alpha = 0.6277  
 gamma = 1e-04  
 Initial states: l = 5.0916  
 s = -0.0554 -0.0519 0.3689 0.1354 0.157 -0.042  
 0.1625 0.1665 -0.2435 0.0253 -0.5573 -0.0654  
 sigma: 0.5376  
 AIC=653.0579 AICc=656.2794 BIC=699.6471

**TEMPERATURA**

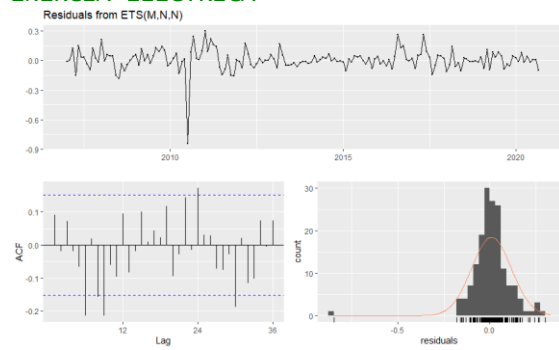
ETS(A,N,A)  
 Call: ets(y = temp)  
 Smoothing parameters: alpha = 0.3782  
 gamma = 3e-04  
 Initial states: l = 22.0652  
 s = -6.9101 -3.9891 0.5493 3.4337 6.1877 5.5364  
 5.3995 3.8287 1.1901 -1.9726 -5.1621 -8.0916  
 sigma: 1.1469  
 AIC=903.0897 AICc=906.3111 BIC=949.6788

**BIOGAS**



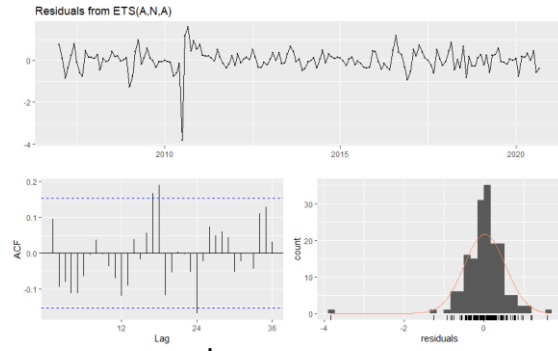
Ljung-Box test  
 data: Residuals from ETS(A,N,N)  
 Q\* = 29.764, df = 22, p-value = 0.1243  
 Model df: 2. Total lags used: 24

**ENERGÍA ELÉCTRICA**



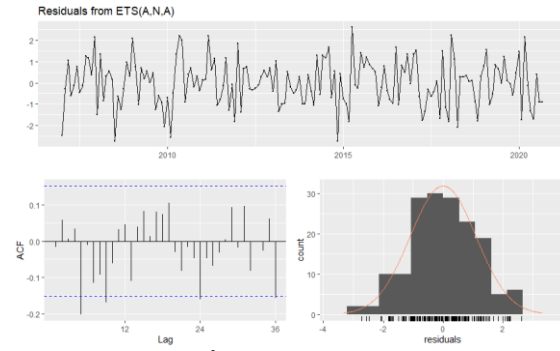
Ljung-Box test  
 data: Residuals from ETS(M,N,N)  
 Q\* = 45.74, df = 22, p-value = 0.002135  
 Model df: 2. Total lags used: 24

### GASTO



Ljung-Box test  
data: Residuals from ETS(A,N,A)  
 $Q^* = 36.861$ ,  $df = 10$ ,  $p\text{-value} = 5.981e-05$   
Model  $df: 14$ . Total lags used: 24

### TEMPERATURA



Ljung-Box test  
data: Residuals from ETS(A,N,A)  
 $Q^* = 33.189$ ,  $df = 10$ ,  $p\text{-value} = 0.0002532$   
Model  $df: 14$ . Total lags used: 24



## ANEXO 12. RESULTADOS MÉTODO ARIMA

### SCRIPT

```
### Auto Arima BIOGÁS
biogas_arima<-auto.arima(biogas)
accuracy(biogas_arima)
checkresiduals(biogas_arima)
autoplot(biogas, series="Biogás", col="gray") + autolayer(biogas_arima$fitted,
series="Arima") + autolayer(forecast(biogas_arima,h=24)) + theme_bw() + xlab("")
+ ylab("Biogás, MMm3/mes")

### Auto Arima ENERGÍA ELÉCTRICA
ee_arima<-auto.arima(ee)
accuracy(ee_arima)
checkresiduals(ee_arima)
autoplot(ee, series="Energía Eléctrica", col="gray") + autolayer(ee_arima$fitted,
series="Arima") + autolayer(forecast(ee_arima,h=24))+ theme_bw() + xlab("") +
ylab("Energía Eléctrica,Gwh/mes")

### Auto Arima GASTO
gasto_arima<-auto.arima(gasto)
accuracy(gasto_arima)
checkresiduals(gasto_arima)
autoplot(gasto, series="Gasto", col="gray") + autolayer(gasto_arima$fitted,
series="Arima") + autolayer(forecast(gasto_arima,h=24)) + theme_bw() + xlab("") +
ylab("Gasto, MMm3G/mes")

### Auto Arima TEMPERATURA
temp_arima<-auto.arima(temp)
accuracy(temp_arima)
checkresiduals(temp_arima)
autoplot(temp, series="Temperatura", col="gray") + autolayer(temp_arima$fitted,
series="Arima") + autolayer(forecast(temp_arima,h=24)) + theme_bw() + xlab("") +
ylab("Temperatura, °C")
```

### PLANTA "DULCES NOMBRES"

#### BIOGÁS

```
Series: biogas
ARIMA(2,1,2)(2,0,0)[12]
Coefficients:
      ar1      ar2      ma1      ma2      sar1      sar2
 0.1878  0.3877 -0.7791 -0.1510  0.3572  0.1534
s.e.  0.3622  0.1445  0.3889  0.3344  0.0872  0.0898
sigma^2 estimated as 0.2706:  log likelihood=-124.15
AIC=262.29  AICc=263.01  BIC=283.99
```

#### ENERGÍA ELÉCTRICA

```
Series: ee
ARIMA(1,1,1)(2,0,0)[12]
Coefficients:
      ar1      ma1      sar1      sar2
 0.3665 -0.8026  0.3366  0.2168
s.e.  0.1342  0.0859  0.0807  0.0859
sigma^2 estimated as 0.0402:  log likelihood=30.85
AIC=-51.69  AICc=-51.31  BIC=-36.19
```

### GASTO

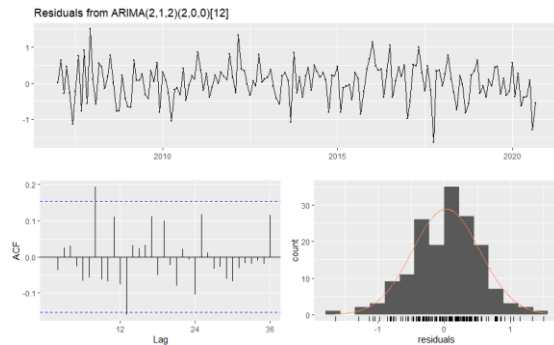
Series: gasto  
ARIMA(3,1,0)(2,0,0)[12]  
Coefficients:  
          ar1      ar2      ar3      sar1      sar2  
         -0.2475  -0.1633  -0.1987  0.3865  0.2916  
s.e.      0.0820  0.0817  0.0790  0.0763  0.0860  
sigma^2 estimated as 0.704: log likelihood=-204.67  
AIC=421.34  AICC=421.88  BIC=439.94

### TEMPERATURA

Series: temp  
ARIMA(1,0,1)(2,1,2)[12] with drift

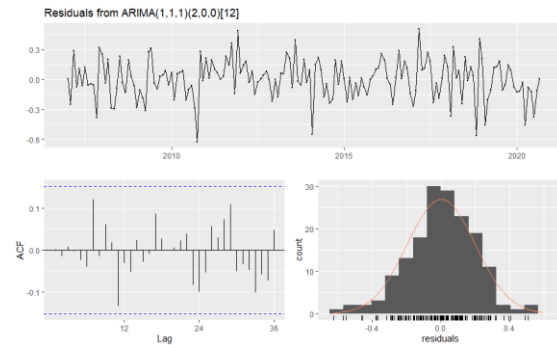
Coefficients:  
          ar1      ma1      sar1      sar2      sma1      sma2      drift  
          0.7408  -0.4368  0.4876  -0.2178  -1.3049  0.3778  0.0045  
s.e.      0.1016  0.1229  0.3904  0.1223  0.3732  0.3760  0.0036  
sigma^2 estimated as 1.255: log likelihood=-242.03  
AIC=500.07  AICC=501.07  BIC=524.31

### BIOGAS



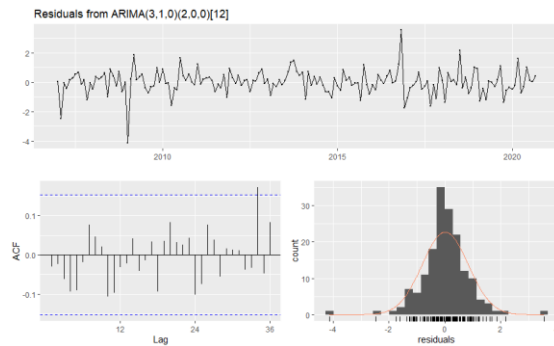
Ljung-Box test  
data: Residuals from  
ARIMA(2,1,2)(2,0,0)[12]  
Q\* = 26.588, df = 18, p-value =  
0.08705  
Model df: 6. Total lags used: 24

### ENERGÍA ELÉCTRICA



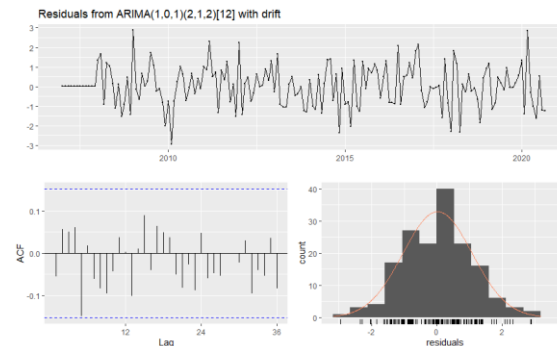
Ljung-Box test  
data: Residuals from  
ARIMA(1,1,1)(2,0,0)[12]  
Q\* = 13.169, df = 20, p-value = 0.87  
Model df: 4. Total lags used: 24

### GASTO



Ljung-Box test  
data: Residuals from  
ARIMA(3,1,0)(2,0,0)[12]  
Q\* = 16.169, df = 19, p-value = 0.646  
Model df: 5. Total lags used: 24

### TEMPERATURA



Ljung-Box test  
data: Residuals from  
ARIMA(1,0,1)(2,1,2)[12] with drift  
Q\* = 19.208, df = 17, p-value = 0.3168  
Model df: 7. Total lags used: 24

## PLANTA "NORTE"

### BIOGÁS

Series: biogas  
 ARIMA(1,1,1)(1,0,0)[12]  
 Coefficients:  
           ar1      ma1      sar1  
           0.2944  -0.7905  0.0286  
 s.e.      0.1300  0.0899  0.0841  
 sigma^2 estimated as 0.0769: log likelihood=-21.11  
 AIC=50.23  AICC=50.48  BIC=62.639

### ENERGÍA ELÉCTRICA

Series: ee  
 ARIMA(1,1,1)(0,0,2)[12]  
 Coefficients:  
           ar1      ma1      sma1      sma2  
           0.5317  -0.9126  0.0962  0.1592  
 s.e.      0.1019  0.0522  0.0830  0.0775  
 sigma^2 estimated as 0.03714: log likelihood=38.65  
 AIC=-67.3  AICC=-66.92  BIC=-51.8

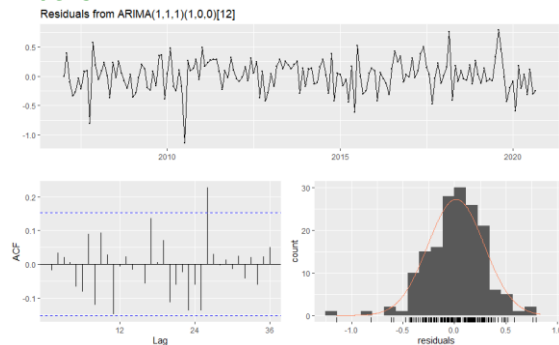
### GASTO

Series: gasto  
 ARIMA(1,1,1)  
 Coefficients:  
           ar1      ma1  
           0.5562  -0.9176  
 s.e.      0.0856  0.0404  
 sigma^2 estimated as 0.3136: log likelihood=-137.01  
 AIC=280.02  AICC=280.17  BIC=289.31

### TEMPERATURA

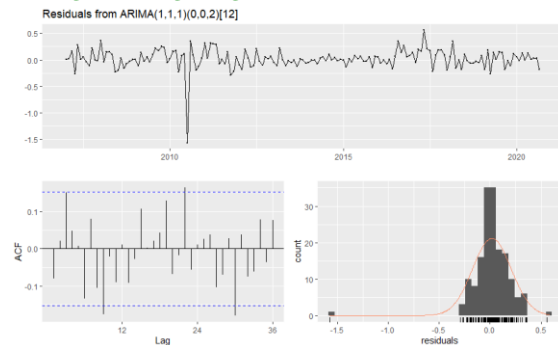
Series: temp  
 ARIMA(1,0,1)(2,1,2)[12] with drift  
 Coefficients:  
           ar1      ma1      sar1      sar2      sma1      sma2      drift  
           0.7408  -0.4368  0.4876  -0.2178  -1.3049  0.3778  0.0045  
 s.e.      0.1016  0.1229  0.3904  0.1223  0.3732  0.3760  0.0036  
 sigma^2 estimated as 1.255: log likelihood=-242.03  
 AIC=500.07  AICC=501.07  BIC=524.31

### BIOGAS



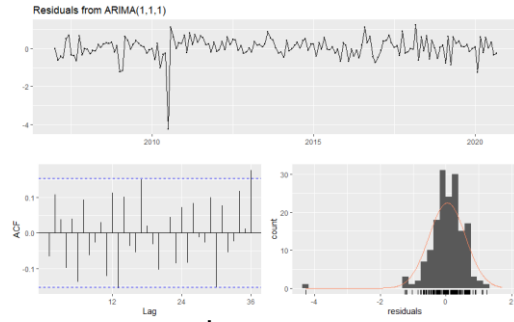
Ljung-Box test  
 data: Residuals from  
 ARIMA(1,1,1)(1,0,0)[12]  
 Q\* = 24.689, df = 21, p-value = 0.2609  
 Model df: 3. Total lags used: 24

### ENERGÍA ELÉCTRICA



Ljung-Box test  
 data: Residuals from  
 ARIMA(1,1,1)(0,0,2)[12]  
 Q\* = 32.788, df = 20, p-value = 0.03559  
 Model df: 4. Total lags used: 24

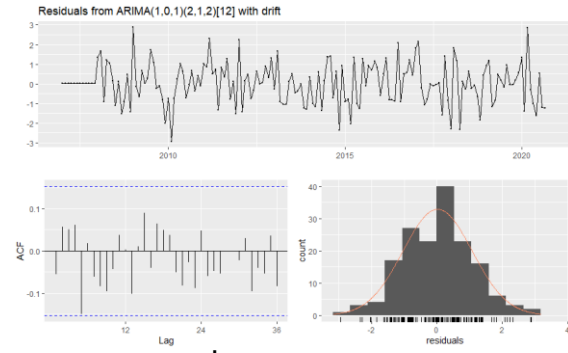
### GASTO



#### Ljung-Box test

data: Residuals from ARIMA(1,1,1)  
Q\* = 31.951, df = 22, p-value =  
0.07824  
Model df: 2. Total lags used: 24

### TEMPERATURA



#### Ljung-Box test

data: Residuals from  
ARIMA(1,0,1)(2,1,2)[12] with drift  
Q\* = 19.208, df = 17, p-value = 0.3168  
Model df: 7. Total lags used: 24

## ANEXO 13. RESULTADOS MODELO AUTORREGRESIÓN DE LAS REDES NEURONALES

### SCRIPT

```
### Neural networks BIOGÁS
fit.nnar.biogas <- nnetar(biogas, lambda=0)
autoplot(biogas, series="Biogás", col="gray")+
  autolayer(fit.nnar.biogas$fitted, series="NNAR")+
  autolayer(forecast(fit.nnar.biogas,h=24, PI=TRUE))+
  theme_bw()+xlab("")+ylab("Biogás, MMm3/mes")
accuracy(fit.nnar.biogas)

### Neural networks ENERGÍA ELÉCTRICA
fit.nnar.ee <- nnetar(ee, lambda=0)
autoplot(ee, series="Biogás", col="gray")+
  autolayer(fit.nnar.ee$fitted, series="NNAR")+
  autolayer(forecast(fit.nnar.ee,h=24, PI=TRUE))+
  theme_bw()+xlab("")+ylab("Energía Eléctrica, Gwh/mes")
accuracy(fit.nnar.ee)

##### Neural networks GASTO
fit.nnar.gasto <- nnetar(gasto, lambda=0)
autoplot(gasto, series="Gasto", col="gray")+
  autolayer(fit.nnar.gasto$fitted, series="NNAR")+
  autolayer(forecast(fit.nnar.gasto,h=24, PI=TRUE))+
  theme_bw()+xlab("")+ylab("Gasto, MMm3G/mes")
accuracy(fit.nnar.gasto)

##### Neural networks TEMPERATURA
fit.nnar.temp <- nnetar(temp, lambda=0)
autoplot(temp, series="Temperatura", col="gray")+
  autolayer(fit.nnar.temp$fitted, series="NNAR")+
  autolayer(forecast(fit.nnar.temp,h=24, PI=TRUE))+
  theme_bw()+xlab("")+ylab("Temperatura, °C")
accuracy(fit.nnar.temp)
```

### PLANTA "DULCES NOMBRES"

#### BIOGÁS

```
Series: biogas
Model: NNAR(2,1,2)[12]
Call: nnetar(y = biogas, lambda = 0)
Average of 20 networks, each of which is a 3-2-1 network with 11 weights options
were - linear output units
sigma^2 estimated as 0.01163
```

#### ENERGÍA ELÉCTRICA

```
Series: ee
Model: NNAR(3,1,2)[12]
Call: nnetar(y = ee, lambda = 0)
Average of 20 networks, each of which is a 4-2-1 network with 13 weights options
were - linear output units
sigma^2 estimated as 0.002916
```

#### AGUA TRATADA

```
Series: gasto
Model: NNAR(4,1,3)[12]
Call: nnetar(y = gasto, lambda = 0)
Average of 20 networks, each of which is a 5-3-1 network with 22 weights options
were - linear output units
sigma^2 estimated as 0.003093
```

#### TEMPERATURA

Series: temp  
Model: NNAR(5,1,4)[12]  
Call: nnetar(y = temp, lambda = 0)  
Average of 20 networks, each of which is a 6-4-1 network with 33 weights options were - linear output units  
sigma<sup>2</sup> estimated as 0.002602

#### PLANTA "NORTE"

##### BIOGÁS

Series: biogas  
Model: NNAR(4,1,3)[12]  
Call: nnetar(y = biogas, lambda = 0)  
Average of 20 networks, each of which is a 5-3-1 network with 22 weights options were - linear output units  
sigma<sup>2</sup> estimated as 0.04014

##### ENERGÍA ELÉCTRICA

Series: ee  
Model: NNAR(3,1,2)[12]  
Call: nnetar(y = ee, lambda = 0)  
Average of 20 networks, each of which is a 4-2-1 network with 13 weights options were - linear output units  
sigma<sup>2</sup> estimated as 0.01805

##### AGUA TRATADA

Series: gasto  
Model: NNAR(3,1,2)[12]  
Call: nnetar(y = gasto, lambda = 0)  
Average of 20 networks, each of which is a 4-2-1 network with 13 weights options were - linear output units  
sigma<sup>2</sup> estimated as 0.04342

#### TEMPERATURA

Series: temp  
Model: NNAR(5,1,4)[12]  
Call: nnetar(y = temp, lambda = 0)  
Average of 20 networks, each of which is a 6-4-1 network with 33 weights options were - linear output units  
sigma<sup>2</sup> estimated as 0.002597

## ANEXO 14. RESULTADOS MODELOS DINAMICOS

### SCRIPT

```
fit_ee <- auto.arima(biogas, xreg=ee)
summary(fit_ee)
checkresiduals(fit_ee)
fcast.ee <- forecast(fit_ee, xreg=rep(mean(biogas),24))
autoplot(fcast.ee) + xlab("Con Energía Eléctrica") + ylab("Biogás")+theme_bw()
accuracy(fit_ee)

fit_biogas <- auto.arima(ee, xreg=biogas)
summary(fit_biogas)
checkresiduals(fit_biogas)
fcast.biogas <- forecast(fit_biogas, xreg=rep(mean(ee),24))
autoplot(fcast.biogas) + xlab("Con Biogás") + ylab("Energía Eléctrica")
+theme_bw()
accuracy(fit_biogas)

fit_gasto <- auto.arima(biogas, xreg=gasto)
summary(fit_gasto)
checkresiduals(fit_gasto)
fcast.gasto <- forecast(fit_gasto, xreg=rep(mean(biogas),24))
autoplot(fcast.gasto) + xlab("Con Agua Tratada") + ylab("Biogás")+theme_bw()
accuracy(fit_gasto)

fit_biogas2 <- auto.arima(gasto, xreg=biogas)
summary(fit_biogas2)
checkresiduals(fit_biogas2)
fcast.biogas2 <- forecast(fit_biogas2, xreg=rep(mean(gasto),24))
autoplot(fcast.biogas2) + xlab("Con Biogás") + ylab("Gasto")+theme_bw()
accuracy(fit_biogas2)

fit_temp <- auto.arima(biogas, xreg=temp)
summary(fit_temp)
checkresiduals(fit_temp)
fcast.temp <- forecast(fit_temp, xreg=rep(mean(biogas),24))
autoplot(fcast.temp) + xlab("Con Temperatura") + ylab("Biogás")+theme_bw()
accuracy(fit_temp)

fit_gasto2 <- auto.arima(ee, xreg=gasto)
summary(fit_gasto2)
checkresiduals(fit_gasto2)
fcast.gasto2 <- forecast(fit_gasto2, xreg=rep(mean(ee),24))
autoplot(fcast.gasto2) + xlab("Con Agua Tratada") + ylab("Energía
Eléctrica")+theme_bw()
accuracy(fit_gasto2)

fit_ee2 <- auto.arima(gasto, xreg=ee)
summary(fit_ee2)
checkresiduals(fit_ee2)
fcast.ee2 <- forecast(fit_ee2, xreg=rep(mean(gasto),24))
autoplot(fcast.ee2) + xlab("Energía Eléctrica") + ylab("Con Agua
Tratada")+theme_bw()
accuracy(fit_ee2)
```

## PLANTA "DULCES NOMBRES"

### BIOGÁS CON ENERGÍA ELÉCTRICA

Series: biogas

Regression with ARIMA(2,1,2)(1,0,0)[12] errors

Coefficients:

|      | ar1     | ar2    | ma1     | ma2     | sar1   | xreg   |
|------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|
|      | -0.3686 | 0.4372 | -0.2186 | -0.6559 | 0.2916 | 0.8265 |
| s.e. | 0.2500  | 0.0918 | 0.2646  | 0.2254  | 0.0945 | 0.2093 |

sigma<sup>2</sup> estimated as 0.2546: log likelihood=-118.57

AIC=251.13 AICC=251.85 BIC=272.83

Training set error measures:

|              | ME        | RMSE     | MAE       | MPE        | MAPE     | MASE      | ACF1        |
|--------------|-----------|----------|-----------|------------|----------|-----------|-------------|
| Training set | 0.0348539 | 0.493797 | 0.3929379 | -0.3709494 | 9.192177 | 0.6334618 | -0.03003683 |

### ENERGÍA ELÉCTRICA CON BIOGÁS

Series: ee

Regression with ARIMA(0,1,2)(2,0,0)[12] errors

Coefficients:

|      | ma1     | ma2     | sar1   | sar2   | xreg   |
|------|---------|---------|--------|--------|--------|
|      | -0.5227 | -0.1766 | 0.2745 | 0.1858 | 0.0960 |
| s.e. | 0.0859  | 0.0822  | 0.0827 | 0.0887 | 0.0308 |

sigma<sup>2</sup> estimated as 0.03852: log likelihood=35.45

AIC=-58.89 AICC=-58.36 BIC=-40.29

Training set error measures:

|              | ME          | RMSE     | MAE       | MPE       | MAPE    | MASE      | ACF1        |
|--------------|-------------|----------|-----------|-----------|---------|-----------|-------------|
| Training set | 0.002552629 | 0.192665 | 0.1470532 | -0.149208 | 3.98666 | 0.5805322 | 0.007813619 |

### BIOGÁS CON AGUA TRATADA

Series: biogas

Regression with ARIMA(2,0,0)(1,0,0)[12] errors

Coefficients:

|      | ar1    | ar2    | sar1   | intercept | xreg   |
|------|--------|--------|--------|-----------|--------|
|      | 0.3752 | 0.3527 | 0.3820 | 1.5320    | 0.1950 |
| s.e. | 0.0748 | 0.0762 | 0.0837 | 0.6703    | 0.0425 |

sigma<sup>2</sup> estimated as 0.2501: log likelihood=-118.57

AIC=249.14 AICC=249.67 BIC=267.78

Training set error measures:

|              | ME         | RMSE      | MAE       | MPE       | MAPE    | MASE      | ACF1       |
|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|------------|
| Training set | 0.01422041 | 0.4924837 | 0.3852405 | -1.095306 | 9.09631 | 0.6210525 | 0.03794217 |

### AGUA TRATADA CON BIOGÁS

Series: gasto

Regression with ARIMA(3,1,0)(2,0,0)[12] errors

Coefficients:

|      | ar1     | ar2     | ar3     | sar1   | sar2   | xreg   |
|------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
|      | -0.2810 | -0.1209 | -0.1807 | 0.3752 | 0.2557 | 0.2845 |
| s.e. | 0.0827  | 0.0867  | 0.0804  | 0.0784 | 0.0897 | 0.1290 |

sigma<sup>2</sup> estimated as 0.6923: log likelihood=-202.15

AIC=418.31 AICC=419.03 BIC=440.01

Training set error measures:

|              | ME         | RMSE      | MAE       | MPE        | MAPE     | MASE      | ACF1        |
|--------------|------------|-----------|-----------|------------|----------|-----------|-------------|
| Training set | 0.01401737 | 0.8142053 | 0.5597092 | -0.1008779 | 3.834737 | 0.5031927 | -0.02151119 |

### BIOGÁS CON TEMPERATURA

Series: biogas

Regression with ARIMA(2,1,2)(2,0,0)[12] errors

Coefficients:

|      | ar1    | ar2    | ma1     | ma2     | sar1   | sar2   | xreg    |
|------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|
|      | 0.1924 | 0.3867 | -0.7864 | -0.1437 | 0.3552 | 0.1494 | -0.0056 |
| s.e. | 0.3633 | 0.1442 | 0.3904  | 0.3355  | 0.0875 | 0.0908 | 0.0185  |

sigma<sup>2</sup> estimated as 0.2723: log likelihood=-124.1

AIC=264.2 AICC=265.13 BIC=289

Training set error measures:

|              | ME         | RMSE     | MAE       | MPE        | MAPE     | MASE      | ACF1          |
|--------------|------------|----------|-----------|------------|----------|-----------|---------------|
| Training set | 0.02742087 | 0.508998 | 0.4021614 | -0.5381394 | 9.416319 | 0.6483311 | -0.0005690252 |



**ENERGÍA ELÉCTRICA CON AGUA TRATADA**

Series: ee  
 Regression with ARIMA(1,0,0)(2,0,0)[12] errors  
 Coefficients:

|      |        |        |        |           |        |
|------|--------|--------|--------|-----------|--------|
|      | ar1    | sar1   | sar2   | intercept | xreg   |
|      | 0.6524 | 0.1773 | 0.1595 | 1.9056    | 0.1237 |
| s.e. | 0.0617 | 0.0868 | 0.0918 | 0.2389    | 0.0154 |

sigma^2 estimated as 0.03498: log likelihood=44.18  
 AIC=-76.36 AICc=-75.82 BIC=-57.72

Training set error measures:

|              |             |           |           |            |          |          |             |
|--------------|-------------|-----------|-----------|------------|----------|----------|-------------|
|              | ME          | RMSE      | MAE       | MPE        | MAPE     | MASE     | ACF1        |
| Training set | 0.004641115 | 0.1841694 | 0.1443833 | -0.1358753 | 3.906873 | 0.569992 | -0.02194105 |

**AGUA TRATADA CON ENERGÍA ELÉCTRICA**

Series: gasto  
 Regression with ARIMA(3,1,0)(2,0,0)[12] errors  
 Coefficients:

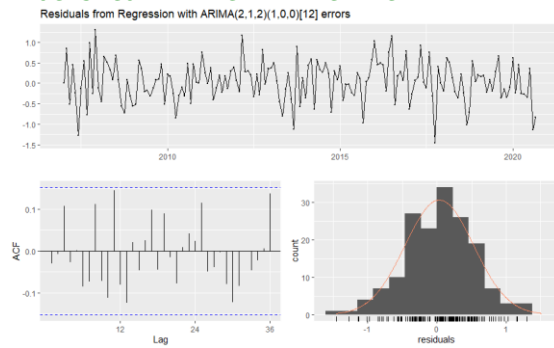
|      |         |         |         |        |        |        |
|------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
|      | ar1     | ar2     | ar3     | sar1   | sar2   | xreg   |
|      | -0.1703 | -0.1423 | -0.1625 | 0.2713 | 0.3049 | 1.4436 |
| s.e. | 0.0844  | 0.0815  | 0.0811  | 0.0821 | 0.0864 | 0.3428 |

sigma^2 estimated as 0.6449: log likelihood=-195.91  
 AIC=405.82 AICc=406.54 BIC=427.52

Training set error measures:

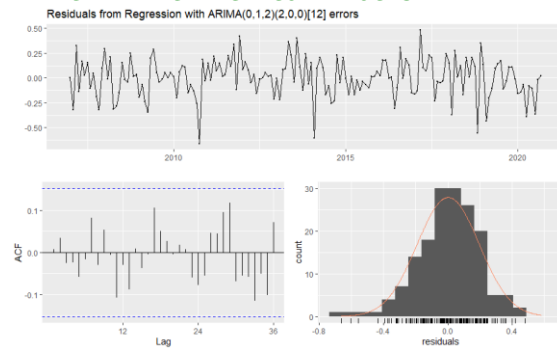
|              |            |           |           |             |          |           |             |
|--------------|------------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|-------------|
|              | ME         | RMSE      | MAE       | MPE         | MAPE     | MASE      | ACF1        |
| Training set | 0.01512231 | 0.7858637 | 0.5481669 | -0.08501063 | 3.776114 | 0.4928158 | -0.03009247 |

**BIOGÁS CON ENERGÍA ELÉCTRICA**



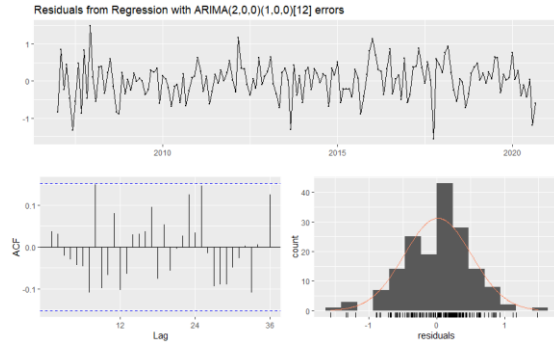
Ljung-Box test  
 data: Residuals from Regression with  
 ARIMA(2,1,2)(1,0,0)[12] errors  
 Q\* = 23.558, df = 18, p-value = 0.17  
 Model df: 6. Total lags used: 24

**ENERGÍA ELÉCTRICA CON BIOGÁS**



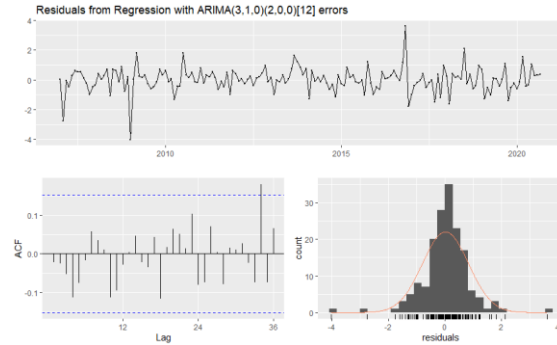
Ljung-Box test  
 data: Residuals from Regression with  
 ARIMA(0,1,2)(2,0,0)[12] errors  
 Q\* = 11.564, df = 19, p-value = 0.9034  
 Model df: 5. Total lags used: 24

**BIOGÁS CON AGUA TRATADA**



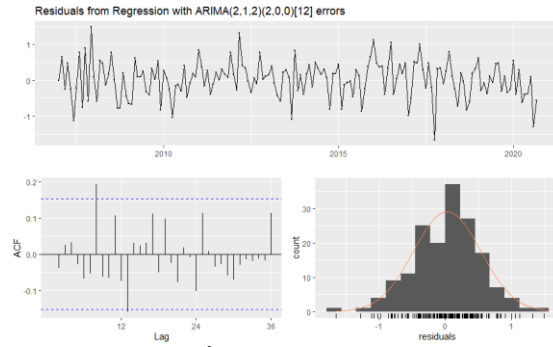
Ljung-Box test  
 data: Residuals from Regression with  
 ARIMA(2,0,0)(1,0,0)[12] errors  
 Q\* = 21.781, df = 19, p-value = 0.2953  
 Model df: 5. Total lags used: 24

**AGUA TRATADA CON BIOGÁS**



Ljung-Box test  
 data: Residuals from Regression with  
 ARIMA(3,1,0)(2,0,0)[12] errors  
 Q\* = 17.178, df = 18, p-value = 0.5109  
 Model df: 6. Total lags used: 24

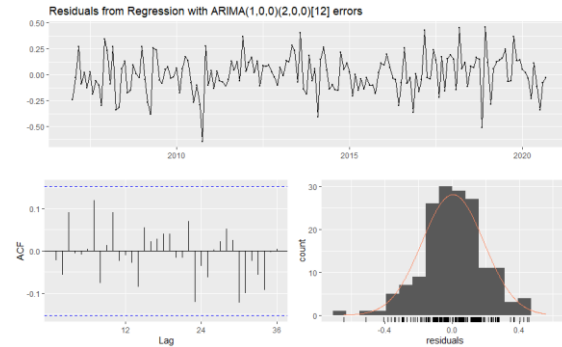
### BIOGÁS CON TEMPERATURA



Ljung-Box test  
 data: Residuals from Regression with  
 ARIMA(2,1,2)(2,0,0)[12] errors  
 Q\* = 26.032, df = 17, p-value =  
 0.07387

Model df: 7. Total lags used: 24

### ENERGÍA ELÉCTRICA CON AGUA TRATADA



Ljung-Box test  
 data: Residuals from Regression with  
 ARIMA(1,0,0)(2,0,0)[12] errors  
 Q\* = 14.229, df = 19, p-value = 0.7702  
 Model df: 5. Total lags used: 24

### AGUA TRATADA CON ENERGÍA ELÉCTRICA



Ljung-Box test  
 data: Residuals from Regression with  
 ARIMA(3,1,0)(2,0,0)[12] errors  
 Q\* = 11.417, df = 18, p-value = 0.8758  
 Model df: 6. Total lags used: 24

### PLANTA "NORTE"

#### BIOGÁS CON ENERGÍA ELÉCTRICA

Series: biogas

Regression with ARIMA(0,1,3)(2,0,0)[12] errors

Coefficients:

|      | ma1     | ma2     | ma3     | sar1    | sar2    | xreg   |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
|      | -0.5637 | -0.0689 | -0.0673 | -0.0055 | -0.1383 | 0.5964 |
| s.e. | 0.0803  | 0.0943  | 0.0736  | 0.0872  | 0.0947  | 0.0948 |

sigma^2 estimated as 0.06272: log likelihood=-3.1

AIC=20.19 AICC=20.91 BIC=41.89

Training set error measures:

|              | ME          | RMSE     | MAE       | MPE       | MAPE     | MASE      | ACF1         |
|--------------|-------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|--------------|
| Training set | 0.009002161 | 0.245064 | 0.1918581 | -3.339305 | 13.68997 | 0.5774346 | -0.000472642 |

### ENERGÍA ELÉCTRICA CON BIOGÁS

Series: ee

Regression with ARIMA(2,1,1)(2,0,1)[12] errors

Coefficients:

|      | ar1    | ar2    | ma1     | sar1    | sar2   | sma1   | xreg   |
|------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|
|      | 0.4827 | 0.1966 | -0.9615 | -0.0217 | 0.1639 | 0.1395 | 0.2837 |
| s.e. | 0.0967 | 0.0898 | 0.0529  | 0.5245  | 0.1036 | 0.5324 | 0.0482 |

sigma<sup>2</sup> estimated as 0.03044: log likelihood=56.45

AIC=-96.91 AICC=-95.98 BIC=-72.11

Training set error measures:

|              | ME         | RMSE      | MAE       | MPE       | MAPE     | MASE      | ACF1        |
|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-------------|
| Training set | 0.01325615 | 0.1701908 | 0.1197467 | -1.782011 | 8.720365 | 0.5083503 | -0.03460469 |

### BIOGÁS CON AGUA TRATADA

Series: biogas

Regression with ARIMA(0,1,2)(1,0,0)[12] errors

Coefficients:

|      | ma1     | ma2     | sar1   | xreg  |
|------|---------|---------|--------|-------|
|      | -0.5970 | -0.1461 | 0.0444 | 0.247 |
| s.e. | 0.0767  | 0.0787  | 0.0872 | 0.032 |

sigma<sup>2</sup> estimated as 0.05736: log likelihood=3.34

AIC=3.33 AICC=3.71 BIC=18.83

Training set error measures:

|              | ME         | RMSE      | MAE       | MPE       | MAPE     | MASE      | ACF1        |
|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-------------|
| Training set | 0.01083785 | 0.2358513 | 0.1800053 | -2.154054 | 11.99526 | 0.5417613 | 0.005268171 |

### AGUA TRATADA CON BIOGÁS

Series: gasto

Regression with ARIMA(1,0,0)(1,0,0)[12] errors

Coefficients:

|      | ar1    | sar1   | intercept | xreg   |
|------|--------|--------|-----------|--------|
|      | 0.5682 | 0.1699 | 3.8175    | 1.1111 |
| s.e. | 0.0729 | 0.0834 | 0.2746    | 0.1395 |

sigma<sup>2</sup> estimated as 0.2334: log likelihood=-112.42

AIC=234.84 AICC=235.22 BIC=250.37

Training set error measures:

|              | ME            | RMSE      | MAE       | MPE       | MAPE     | MASE      | ACF1        |
|--------------|---------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-------------|
| Training set | -0.0009741634 | 0.4771885 | 0.3324938 | -9.141884 | 14.57193 | 0.5453851 | -0.06173677 |

### BIOGÁS CON TEMPERATURA

Series: biogas

Regression with ARIMA(1,1,1)(1,0,0)[12] errors

Coefficients:

|      | ar1    | ma1     | sar1   | xreg   |
|------|--------|---------|--------|--------|
|      | 0.3024 | -0.7902 | 0.0222 | 0.0061 |
| s.e. | 0.1331 | 0.0914  | 0.0844 | 0.0056 |

sigma<sup>2</sup> estimated as 0.0768: log likelihood=-20.49

AIC=50.99 AICC=51.36 BIC=66.48

Training set error measures:

|              | ME         | RMSE      | MAE       | MPE       | MAPE     | MASE      | ACF1        |
|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-------------|
| Training set | 0.01421726 | 0.2729009 | 0.2090741 | -12.62079 | 24.17465 | 0.6292495 | -0.01902626 |

### ENERGÍA ELÉCTRICA CON AGUA TRATADA

Series: ee

Regression with ARIMA(1,1,1)(2,0,0)[12] errors

Coefficients:

|      | ar1    | ma1     | sar1   | sar2   | drift  | xreg   |
|------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
|      | 0.7157 | -0.9242 | 0.1523 | 0.1065 | 0.0022 | 0.2461 |
| s.e. | 0.1119 | 0.0680  | 0.0818 | 0.0854 | 0.0040 | 0.0197 |

sigma<sup>2</sup> estimated as 0.01931: log likelihood=93.54

AIC=-173.07 AICC=-172.35 BIC=-151.37

Training set error measures:

|              | ME          | RMSE      | MAE      | MPE       | MAPE     | MASE      | ACF1        |
|--------------|-------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|-------------|
| Training set | 0.001377101 | 0.1359827 | 0.101809 | -1.191592 | 6.644759 | 0.4322008 | -0.02700581 |

### AGUA TRATADA CON ENERGÍA ELÉCTRICA

Series: gasto

Regression with ARIMA(3,1,0)(2,0,0)[12] errors

Coefficients:

|      | ar1     | ar2     | ar3     | sar1   | sar2   | xreg   |
|------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
|      | -0.0848 | -0.0141 | -0.1395 | 0.1550 | 0.0211 | 2.0822 |
| s.e. | 0.0784  | 0.0803  | 0.0795  | 0.0827 | 0.0883 | 0.1516 |

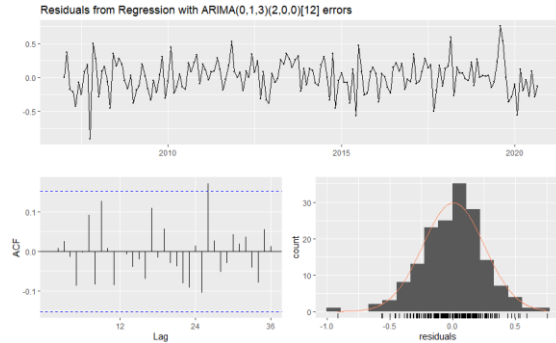
sigma^2 estimated as 0.167: log likelihood=-83.1

AIC=180.2 AICC=180.92 BIC=201.9

Training set error measures:

|              | ME           | RMSE      | MAE       | MPE       | MAPE     | MASE      | ACF1        |
|--------------|--------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-------------|
| Training set | -0.004018145 | 0.3999422 | 0.3199157 | -1.992726 | 7.526957 | 0.5247534 | -0.01890505 |

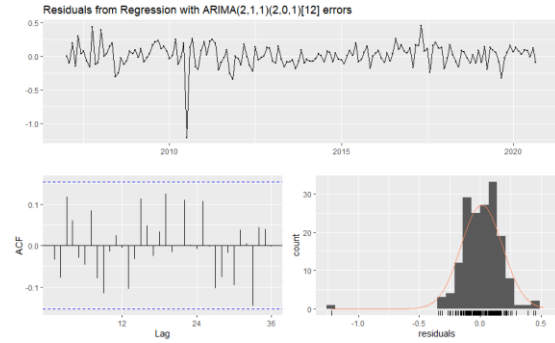
### BIOGÁS CON ENERGÍA ELÉCTRICA



Ljung-Box test

data: Residuals from Regression with ARIMA(0,1,3)(2,0,0)[12] errors  
 $Q^* = 16.01$ ,  $df = 18$ ,  $p\text{-value} = 0.5919$   
 Model  $df = 6$ . Total lags used: 24

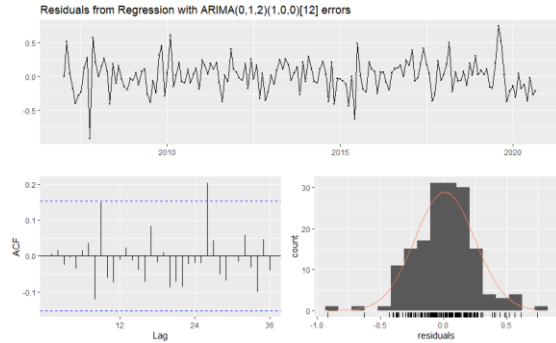
### ENERGÍA ELÉCTRICA CON BIOGÁS



Ljung-Box test

data: Residuals from Regression with ARIMA(2,1,1)(2,0,1)[12] errors  
 $Q^* = 20.23$ ,  $df = 17$ ,  $p\text{-value} = 0.2627$   
 Model  $df = 7$ . Total lags used: 24

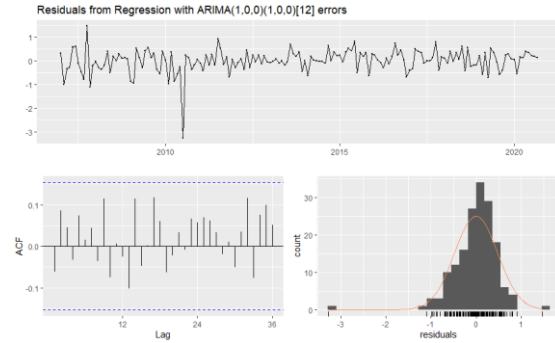
### BIOGÁS CON AGUA TRATADA



Ljung-Box test

data: Residuals from Regression with ARIMA(0,1,2)(1,0,0)[12] errors  
 $Q^* = 15.673$ ,  $df = 20$ ,  $p\text{-value} = 0.7367$   
 Model  $df = 4$ . Total lags used: 24

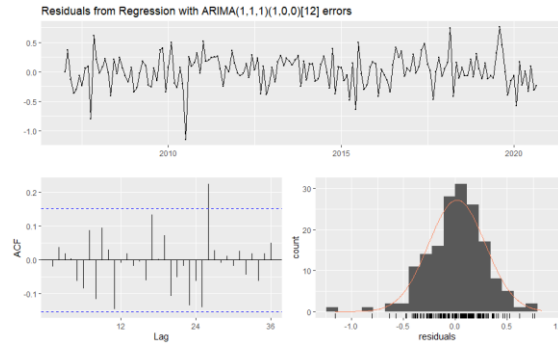
### AGUA TRATADA CON BIOGÁS



Ljung-Box test

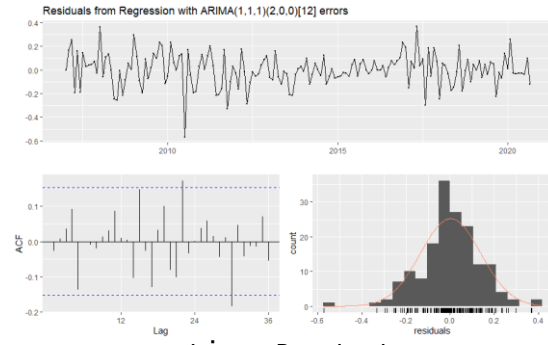
data: Residuals from Regression with ARIMA(1,0,0)(1,0,0)[12] errors  
 $Q^* = 17.869$ ,  $df = 20$ ,  $p\text{-value} = 0.596$   
 Model  $df = 4$ . Total lags used: 24

### BIOGÁS CON TEMPERATURA



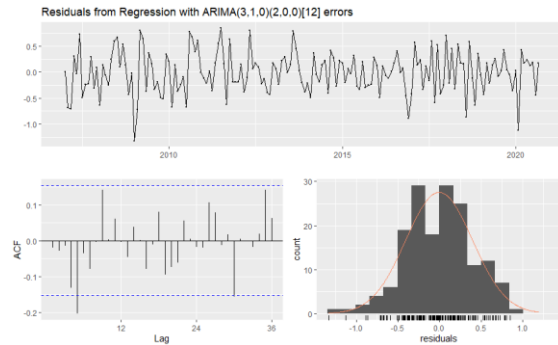
Ljung-Box test  
data: Residuals from Regression with  
ARIMA(1,1,1)(1,0,0)[12] errors  
Q\* = 23.818, df = 20, p-value = 0.2504  
Model df: 4. Total lags used: 24

### ENERGÍA ELÉCTRICA CON AGUA TRATADA



Ljung-Box test  
data: Residuals from Regression with  
ARIMA(1,1,1)(2,0,0)[12] errors  
Q\* = 27.075, df = 18, p-value = 0.0776  
Model df: 6. Total lags used: 24

### AGUA TRATADA CON ENERGÍA ELÉCTRICA



Ljung-Box test  
data: Residuals from Regression with  
ARIMA(3,1,0)(2,0,0)[12] errors  
Q\* = 22.896, df = 18, p-value = 0.1946  
Model df: 6. Total lags used: 24

## ANEXO 15. RESULTADOS DE MODELO DE AUTORREGRESIÓN VECTORIAL

### SCRIPT

```
adf.test(ee)
adf.test(gasto)
adf.test(biogás)
adf.test(temp)

biogás<-diff(biogás)
ee<-diff(ee)
gasto<-diff(gasto)
temp<-diff(temp)

adf.test(ee)
adf.test(gasto)
adf.test(biogás)
adf.test(temp)

v1 <- cbind(biogás, ee, gasto, temp)

colnames(v1) <- cbind("biogás","ee","gasto", "temp")

lagselect <- VARselect(v1, lag.max = 15, type = "const")
lagselect$selection

model.var <- VAR(v1, p = 10, type = "const", season = NULL, exog = NULL)
serial.test(model.var, lags.pt=10, type="PT.asymptotic")

summary(model.var)

####correlation
serial.test(model.var, lags.pt=10, type="PT.asymptotic")

#### arch effects
arch.test(model.var, lags.multi = 15, multivariate.only = TRUE)

#### stability
stable<-stability(model.var, type = "OLS-CUSUM")
plot(stable)

fit.var<- forecast(model.var)

forecast(model.var) %>%
  autoplot() + xlab("")+
  ylab("") + theme_bw()

fit.var1 <- predict(model.var, n.ahead = 24, ci = 0.95)
plot(fit.var1)

##### granger
Granger_biogás<- causality(model.var, cause = "biogás")
Granger_biogás

Granger_ee<- causality(model.var, cause = "ee")
Granger_ee

Granger_gasto<- causality(model.var, cause = "gasto")
Granger_gasto

Granger_temp<- causality(model.var, cause = "temp")
Granger_temp
```

```

##### efectos en otras
bio_irf <- irf(model.var, impulse = "biogas",
              response = "biogas", n.ahead = 24, boot = TRUE)
plot(bio_irf, ylab = "Biogás", main = "Efectos de Biogás en Biogás")

ee_irf <- irf(model.var, impulse = "biogas",
              response = "ee", n.ahead = 24, boot = TRUE)
plot(ee_irf, ylab = "ee", main = "Efectos de Biogás en Energía Eléctrica")

ee_irf2 <- irf(model.var, impulse = "ee",
               response = "biogas", n.ahead = 24, boot = TRUE)
plot(ee_irf2, ylab = "ee", main = "Efectos de Energía Eléctrica en Biogás")

gasto_irf2 <- irf(model.var, impulse = "gasto",
                  response = "biogas", n.ahead = 24, boot = TRUE)
plot(gasto_irf2, ylab = "gasto", main = "Efectos de Agua Tratada en Biogás")

temp_irf2 <- irf(model.var, impulse = "temp",
                  response = "biogas", n.ahead = 24, boot = TRUE)
plot(temp_irf2, ylab = "temp", main = "Efectos de Temperatura en Biogás")

##### los impactos
FEVD1 <- fevd(model.var, n.ahead = 24)
FEVD1 ### esto es el impacto
FEVD1$biogas ### impacto en biogás
plot(FEVD1)

#### pronóstico VAR
forecast <- predict(model.var, n.ahead = 24, ci = 0.95)
forecast
fanchart(forecast, names = "biogas", main = "Pronóstico VAR",
         xlab = "", ylab = "Biogás")

```

## PLANTA “DULCES NOMBRES”

### PRUEBA DICKEY-FULLER PARA DETERMINAR ESTACIONARIEDAD

Los valores de p-value para la energía eléctrica, agua tratada y biogás son mayores a 0.05, por lo que se acepta la hipótesis nula y se establece que no son estacionarias.

|                                                                                                                                          |                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ENERGÍA ELÉCTRICA</b><br>data: ee<br>Dickey-Fuller = -2.582, Lag order = 5,<br>p-value = 0.3335<br>alternative hypothesis: stationary | <b>AGUA TRATADA</b><br>data: gasto<br>Dickey-Fuller = -2.6023, Lag order = 5,<br>p-value = 0.325<br>alternative hypothesis: stationary |
| <b>BIOGAS</b><br>data: biogas<br>Dickey-Fuller = -3.4228, Lag order = 5,<br>p-value = 0.05312<br>alternative hypothesis: stationary      | <b>TEMPERATURA</b><br>data: temp<br>Dickey-Fuller = -9.7274, Lag order = 5,<br>p-value = 0.01<br>alternative hypothesis: stationary    |

### PRUEBA DICKEY-FULLER CON DATOS DIFERENCIADOS 1 VEZ

Se realiza una diferenciación a las variables para determinar si ya son estacionarias. Al revisar los valores de p-value se observa que ya son menores a 0.05, por lo que las variables ya son estacionarias. También se diferencia la variable de temperatura con el fin de que todas las variables sean del mismo tamaño

|                                                                                                   |                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ENERGÍA ELÉCTRICA</b><br>data: ee<br>Dickey-Fuller = -7.9298, Lag order = 5,<br>p-value = 0.01 | <b>AGUA TRATADA</b><br>data: gasto<br>Dickey-Fuller = -7.8042, Lag order = 5,<br>p-value = 0.01 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| alternative hypothesis: stationary<br>BIOGAS<br>data: biogas<br>Dickey-Fuller = -7.0027, Lag order = 5, p-value = 0.01<br>alternative hypothesis: stationary | alternative hypothesis: stationary<br>TEMPERATURA<br>data: temp<br>Dickey-Fuller = -9.617, Lag order = 5, p-value = 0.01<br>alternative hypothesis: stationary |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## ORDEN DE REZAGO

AIC(n)    HQ(n)    SC(n)    FPE(n)  
      12        10        1        12

## MODELO VAR

A continuación, se muestran los resultados de la estimación del sistema VAR usando un orden de rezago de 10, mostrando los resultados para cada una de las ecuaciones correspondientes a las variables que se están analizando, así como la matriz de covarianza y correlación de los residuales.

### VAR Estimation Results:

```
=====
Endogenous variables: biogas, ee, gasto, temp
Deterministic variables: const
Sample size: 154
Log Likelihood: -388.466
Roots of the characteristic polynomial:
0.9976 0.9976 0.9815 0.9815 0.9567 0.9567 0.9564 0.9564 0.9475 0.9475 0.9296
0.916 0.916 0.9035 0.9035 0.895 0.895 0.8781 0.8781 0.8739 0.8739 0.8691 0.8672
0.8672 0.8628 0.8628 0.8554 0.8436 0.8436 0.8238 0.8238 0.8117 0.8117 0.7965
0.7965 0.7662 0.7662 0.714 0.714 0.5103
Call: VAR(y = v1, p = 10, type = "const", exogen = NULL)
```

### Estimation results for equation biogas:

```
=====
biogas = biogas.l1 + ee.l1 + gasto.l1 + temp.l1 + biogas.l2 + ee.l2 + gasto.l2 +
temp.l2 + biogas.l3 + ee.l3 + gasto.l3 + temp.l3 + biogas.l4 + ee.l4 + gasto.l4 +
temp.l4 + biogas.l5 + ee.l5 + gasto.l5 + temp.l5 + biogas.l6 + ee.l6 + gasto.l6 +
temp.l6 + biogas.l7 + ee.l7 + gasto.l7 + temp.l7 + biogas.l8 + ee.l8 + gasto.l8 +
temp.l8 + biogas.l9 + ee.l9 + gasto.l9 + temp.l9 + biogas.l10 + ee.l10 +
gasto.l10 + temp.l10 + const
```

|           | Estimate  | Std. Error | t value | Pr(> t ) |     |
|-----------|-----------|------------|---------|----------|-----|
| biogas.l1 | -0.560128 | 0.093681   | -5.979  | 2.68e-08 | *** |
| ee.l1     | -0.179835 | 0.229968   | -0.782  | 0.435851 |     |
| gasto.l1  | 0.028814  | 0.056187   | 0.513   | 0.609078 |     |
| temp.l1   | 0.007491  | 0.034332   | 0.218   | 0.827664 |     |
| biogas.l2 | -0.203936 | 0.106364   | -1.917  | 0.057720 | .   |
| ee.l2     | 0.262312  | 0.248078   | 1.057   | 0.292595 |     |
| gasto.l2  | -0.046888 | 0.060220   | -0.779  | 0.437838 |     |
| temp.l2   | 0.045917  | 0.031197   | 1.472   | 0.143843 |     |
| biogas.l3 | -0.277816 | 0.112442   | -2.471  | 0.014976 | *   |
| ee.l3     | 0.111273  | 0.269553   | 0.413   | 0.680530 |     |
| gasto.l3  | -0.049767 | 0.060714   | -0.820  | 0.414110 |     |
| temp.l3   | 0.041686  | 0.026848   | 1.553   | 0.123300 |     |
| biogas.l4 | -0.059494 | 0.114526   | -0.519  | 0.604442 |     |
| ee.l4     | 0.241809  | 0.277215   | 0.872   | 0.384906 |     |
| gasto.l4  | -0.028809 | 0.062937   | -0.458  | 0.648017 |     |
| temp.l4   | 0.042942  | 0.025560   | 1.680   | 0.095713 | .   |
| biogas.l5 | -0.161699 | 0.112283   | -1.440  | 0.152604 |     |
| ee.l5     | 0.248030  | 0.279688   | 0.887   | 0.377065 |     |
| gasto.l5  | -0.039860 | 0.062697   | -0.636  | 0.526220 |     |
| temp.l5   | 0.048480  | 0.026801   | 1.809   | 0.073120 | .   |
| biogas.l6 | -0.331215 | 0.108279   | -3.059  | 0.002774 | **  |
| ee.l6     | -0.191924 | 0.278729   | -0.689  | 0.492505 |     |



|            |           |          |        |              |
|------------|-----------|----------|--------|--------------|
| gasto.16   | 0.026168  | 0.062294 | 0.420  | 0.675224     |
| temp.16    | 0.002762  | 0.027320 | 0.101  | 0.919665     |
| biogas.17  | -0.263075 | 0.110546 | -2.380 | 0.018998 *   |
| ee.17      | 0.351607  | 0.289046 | 1.216  | 0.226352     |
| gasto.17   | 0.080089  | 0.062143 | 1.289  | 0.200103     |
| temp.17    | 0.045769  | 0.026678 | 1.716  | 0.088968 .   |
| biogas.18  | 0.023697  | 0.112749 | 0.210  | 0.833913     |
| ee.18      | 0.673601  | 0.288712 | 2.333  | 0.021411 *   |
| gasto.18   | 0.034237  | 0.060066 | 0.570  | 0.569818     |
| temp.18    | 0.010004  | 0.027072 | 0.370  | 0.712424     |
| biogas.19  | -0.164300 | 0.110232 | -1.491 | 0.138879     |
| ee.19      | 0.557104  | 0.264780 | 2.104  | 0.037594 *   |
| gasto.19   | 0.050911  | 0.059883 | 0.850  | 0.397027     |
| temp.19    | 0.044753  | 0.029381 | 1.523  | 0.130503     |
| biogas.110 | -0.223951 | 0.096342 | -2.325 | 0.021883 *   |
| ee.110     | 0.452614  | 0.240545 | 1.882  | 0.062461 .   |
| gasto.110  | 0.113532  | 0.054875 | 2.069  | 0.040834 *   |
| temp.110   | 0.119681  | 0.032329 | 3.702  | 0.000332 *** |
| const      | 0.010560  | 0.039129 | 0.270  | 0.787750     |

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1  
Residual standard error: 0.466 on 113 degrees of freedom  
Multiple R-Squared: 0.5979, Adjusted R-squared: 0.4555  
F-statistic: 4.2 on 40 and 113 DF, p-value: 1.071e-09

Estimation results for equation ee:

=====  
ee = biogas.11 + ee.11 + gasto.11 + temp.11 + biogas.12 + ee.12 + gasto.12 +  
temp.12 + biogas.13 + ee.13 + gasto.13 + temp.13 + biogas.14 + ee.14 + gasto.14 +  
temp.14 + biogas.15 + ee.15 + gasto.15 + temp.15 + biogas.16 + ee.16 + gasto.16 +  
temp.16 + biogas.17 + ee.17 + gasto.17 + temp.17 + biogas.18 + ee.18 + gasto.18 +  
temp.18 + biogas.19 + ee.19 + gasto.19 + temp.19 + biogas.110 + ee.110 +  
gasto.110 + temp.110 + const

|           | Estimate  | Std. Error | t value | Pr(> t ) |     |
|-----------|-----------|------------|---------|----------|-----|
| biogas.11 | 0.027583  | 0.041853   | 0.659   | 0.51121  |     |
| ee.11     | -0.439608 | 0.102741   | -4.279  | 3.95e-05 | *** |
| gasto.11  | -0.057634 | 0.025102   | -2.296  | 0.02352  | *   |
| temp.11   | 0.014641  | 0.015338   | 0.955   | 0.34185  |     |
| biogas.12 | 0.018029  | 0.047519   | 0.379   | 0.70510  |     |
| ee.12     | -0.479237 | 0.110832   | -4.324  | 3.32e-05 | *** |
| gasto.12  | 0.009734  | 0.026904   | 0.362   | 0.71817  |     |
| temp.12   | 0.027940  | 0.013938   | 2.005   | 0.04740  | *   |
| biogas.13 | 0.042672  | 0.050235   | 0.849   | 0.39743  |     |
| ee.13     | -0.304164 | 0.120425   | -2.526  | 0.01293  | *   |
| gasto.13  | -0.038186 | 0.027125   | -1.408  | 0.16194  |     |
| temp.13   | 0.021478  | 0.011995   | 1.791   | 0.07603  | .   |
| biogas.14 | 0.043937  | 0.051166   | 0.859   | 0.39232  |     |
| ee.14     | -0.208235 | 0.123849   | -1.681  | 0.09545  | .   |
| gasto.14  | -0.011496 | 0.028118   | -0.409  | 0.68341  |     |
| temp.14   | 0.010330  | 0.011419   | 0.905   | 0.36758  |     |
| biogas.15 | 0.062729  | 0.050164   | 1.250   | 0.21370  |     |
| ee.15     | -0.210314 | 0.124954   | -1.683  | 0.09511  | .   |
| gasto.15  | 0.030726  | 0.028010   | 1.097   | 0.27500  |     |
| temp.15   | 0.032688  | 0.011973   | 2.730   | 0.00735  | **  |
| biogas.16 | 0.002504  | 0.048375   | 0.052   | 0.95881  |     |
| ee.16     | -0.107344 | 0.124525   | -0.862  | 0.39050  |     |
| gasto.16  | -0.003987 | 0.027830   | -0.143  | 0.88634  |     |
| temp.16   | -0.004980 | 0.012206   | -0.408  | 0.68402  |     |
| biogas.17 | -0.018492 | 0.049388   | -0.374  | 0.70879  |     |
| ee.17     | 0.031460  | 0.129134   | 0.244   | 0.80797  |     |
| gasto.17  | 0.041337  | 0.027763   | 1.489   | 0.13930  |     |
| temp.17   | 0.031254  | 0.011918   | 2.622   | 0.00994  | **  |
| biogas.18 | 0.040551  | 0.050372   | 0.805   | 0.42249  |     |
| ee.18     | 0.102982  | 0.128985   | 0.798   | 0.42631  |     |
| gasto.18  | 0.025862  | 0.026835   | 0.964   | 0.33723  |     |

|            |           |          |        |            |
|------------|-----------|----------|--------|------------|
| temp.18    | 0.008520  | 0.012095 | 0.704  | 0.48259    |
| biogas.19  | -0.021759 | 0.049247 | -0.442 | 0.65945    |
| ee.19      | 0.152692  | 0.118293 | 1.291  | 0.19941    |
| gasto.19   | 0.014051  | 0.026753 | 0.525  | 0.60047    |
| temp.19    | 0.015361  | 0.013126 | 1.170  | 0.24437    |
| biogas.110 | 0.026100  | 0.043042 | 0.606  | 0.54547    |
| ee.110     | 0.044808  | 0.107466 | 0.417  | 0.67751    |
| gasto.110  | 0.044527  | 0.024516 | 1.816  | 0.07198 .  |
| temp.110   | 0.040381  | 0.014443 | 2.796  | 0.00608 ** |
| const      | 0.005780  | 0.017481 | 0.331  | 0.74152    |

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1  
Residual standard error: 0.2082 on 113 degrees of freedom  
Multiple R-Squared: 0.54, Adjusted R-squared: 0.3772  
F-statistic: 3.317 on 40 and 113 DF, p-value: 3.306e-07

Estimation results for equation gasto:

$$\begin{aligned} \text{gasto} = & \text{biogas.11} + \text{ee.11} + \text{gasto.11} + \text{temp.11} + \text{biogas.12} + \text{ee.12} + \text{gasto.12} + \\ & \text{temp.12} + \text{biogas.13} + \text{ee.13} + \text{gasto.13} + \text{temp.13} + \text{biogas.14} + \text{ee.14} + \text{gasto.14} + \\ & \text{temp.14} + \text{biogas.15} + \text{ee.15} + \text{gasto.15} + \text{temp.15} + \text{biogas.16} + \text{ee.16} + \text{gasto.16} + \\ & \text{temp.16} + \text{biogas.17} + \text{ee.17} + \text{gasto.17} + \text{temp.17} + \text{biogas.18} + \text{ee.18} + \text{gasto.18} + \\ & \text{temp.18} + \text{biogas.19} + \text{ee.19} + \text{gasto.19} + \text{temp.19} + \text{biogas.110} + \text{ee.110} + \\ & \text{gasto.110} + \text{temp.110} + \text{const} \end{aligned}$$

|            | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t ) |     |
|------------|----------|------------|---------|----------|-----|
| biogas.11  | -0.20441 | 0.17195    | -1.189  | 0.2370   |     |
| ee.11      | -0.42090 | 0.42211    | -0.997  | 0.3208   |     |
| gasto.11   | -0.42282 | 0.10313    | -4.100  | 7.82e-05 | *** |
| temp.11    | 0.01085  | 0.06302    | 0.172   | 0.8636   |     |
| biogas.12  | -0.23214 | 0.19523    | -1.189  | 0.2369   |     |
| ee.12      | -0.17933 | 0.45535    | -0.394  | 0.6945   |     |
| gasto.12   | -0.08648 | 0.11053    | -0.782  | 0.4356   |     |
| temp.12    | 0.08235  | 0.05726    | 1.438   | 0.1531   |     |
| biogas.13  | -0.06794 | 0.20639    | -0.329  | 0.7426   |     |
| ee.13      | -0.20909 | 0.49476    | -0.423  | 0.6734   |     |
| gasto.13   | -0.23619 | 0.11144    | -2.119  | 0.0362   | *   |
| temp.13    | 0.05667  | 0.04928    | 1.150   | 0.2526   |     |
| biogas.14  | 0.27460  | 0.21021    | 1.306   | 0.1941   |     |
| ee.14      | 0.30340  | 0.50883    | 0.596   | 0.5522   |     |
| gasto.14   | -0.20579 | 0.11552    | -1.781  | 0.0775   | .   |
| temp.14    | 0.05074  | 0.04692    | 1.081   | 0.2818   |     |
| biogas.15  | 0.22599  | 0.20609    | 1.097   | 0.2752   |     |
| ee.15      | 0.04446  | 0.51337    | 0.087   | 0.9311   |     |
| gasto.15   | -0.09688 | 0.11508    | -0.842  | 0.4016   |     |
| temp.15    | 0.05366  | 0.04919    | 1.091   | 0.2777   |     |
| biogas.16  | -0.45429 | 0.19875    | -2.286  | 0.0241   | *   |
| ee.16      | 0.04728  | 0.51161    | 0.092   | 0.9265   |     |
| gasto.16   | -0.06233 | 0.11434    | -0.545  | 0.5868   |     |
| temp.16    | -0.04823 | 0.05015    | -0.962  | 0.3383   |     |
| biogas.17  | -0.34811 | 0.20291    | -1.716  | 0.0890   | .   |
| ee.17      | 0.36912  | 0.53054    | 0.696   | 0.4880   |     |
| gasto.17   | 0.19675  | 0.11406    | 1.725   | 0.0873   | .   |
| temp.17    | 0.06963  | 0.04897    | 1.422   | 0.1578   |     |
| biogas.18  | 0.07370  | 0.20695    | 0.356   | 0.7224   |     |
| ee.18      | 1.23902  | 0.52993    | 2.338   | 0.0211   | *   |
| gasto.18   | 0.08259  | 0.11025    | 0.749   | 0.4554   |     |
| temp.18    | 0.05555  | 0.04969    | 1.118   | 0.2660   |     |
| biogas.19  | -0.09203 | 0.20233    | -0.455  | 0.6501   |     |
| ee.19      | 1.26221  | 0.48600    | 2.597   | 0.0107   | *   |
| gasto.19   | -0.05817 | 0.10992    | -0.529  | 0.5977   |     |
| temp.19    | -0.01830 | 0.05393    | -0.339  | 0.7350   |     |
| biogas.110 | 0.01009  | 0.17683    | 0.057   | 0.9546   |     |
| ee.110     | 0.60979  | 0.44152    | 1.381   | 0.1700   |     |
| gasto.110  | 0.12160  | 0.10072    | 1.207   | 0.2298   |     |
| temp.110   | 0.02016  | 0.05934    | 0.340   | 0.7347   |     |

const 0.04798 0.07182 0.668 0.5054

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1  
 Residual standard error: 0.8553 on 113 degrees of freedom  
 Multiple R-Squared: 0.5528, Adjusted R-squared: 0.3944  
 F-statistic: 3.491 on 40 and 113 DF, p-value: 1.037e-07

Estimation results for equation temp:

=====

temp = biogas.l1 + ee.l1 + gasto.l1 + temp.l1 + biogas.l2 + ee.l2 + gasto.l2 +  
 temp.l2 + biogas.l3 + ee.l3 + gasto.l3 + temp.l3 + biogas.l4 + ee.l4 + gasto.l4 +  
 temp.l4 + biogas.l5 + ee.l5 + gasto.l5 + temp.l5 + biogas.l6 + ee.l6 + gasto.l6 +  
 temp.l6 + biogas.l7 + ee.l7 + gasto.l7 + temp.l7 + biogas.l8 + ee.l8 + gasto.l8 +  
 temp.l8 + biogas.l9 + ee.l9 + gasto.l9 + temp.l9 + biogas.l10 + ee.l10 +  
 gasto.l10 + temp.l10 + const

|            | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t ) |     |
|------------|----------|------------|---------|----------|-----|
| biogas.l1  | 0.03911  | 0.23455    | 0.167   | 0.867862 |     |
| ee.l1      | -1.06813 | 0.57576    | -1.855  | 0.066180 | .   |
| gasto.l1   | 0.29447  | 0.14067    | 2.093   | 0.038559 | *   |
| temp.l1    | -0.53611 | 0.08596    | -6.237  | 7.95e-09 | *** |
| biogas.l2  | 0.81011  | 0.26630    | 3.042   | 0.002921 | **  |
| ee.l2      | -0.26966 | 0.62110    | -0.434  | 0.665000 |     |
| gasto.l2   | -0.29530 | 0.15077    | -1.959  | 0.052619 | .   |
| temp.l2    | -0.30865 | 0.07811    | -3.952  | 0.000136 | *** |
| biogas.l3  | 0.68514  | 0.28151    | 2.434   | 0.016509 | *   |
| ee.l3      | 0.11994  | 0.67486    | 0.178   | 0.859254 |     |
| gasto.l3   | -0.21666 | 0.15201    | -1.425  | 0.156810 |     |
| temp.l3    | -0.42186 | 0.06722    | -6.276  | 6.61e-09 | *** |
| biogas.l4  | 0.46554  | 0.28673    | 1.624   | 0.107245 |     |
| ee.l4      | -1.23404 | 0.69405    | -1.778  | 0.078088 | .   |
| gasto.l4   | 0.23275  | 0.15757    | 1.477   | 0.142422 |     |
| temp.l4    | -0.41891 | 0.06399    | -6.546  | 1.80e-09 | *** |
| biogas.l5  | 0.22102  | 0.28112    | 0.786   | 0.433380 |     |
| ee.l5      | -0.54643 | 0.70024    | -0.780  | 0.436823 |     |
| gasto.l5   | -0.06132 | 0.15697    | -0.391  | 0.696810 |     |
| temp.l5    | -0.58843 | 0.06710    | -8.770  | 2.12e-14 | *** |
| biogas.l6  | 0.31220  | 0.27109    | 1.152   | 0.251906 |     |
| ee.l6      | -2.56524 | 0.69784    | -3.676  | 0.000364 | *** |
| gasto.l6   | 0.03219  | 0.15596    | 0.206   | 0.836830 |     |
| temp.l6    | -0.39022 | 0.06840    | -5.705  | 9.48e-08 | *** |
| biogas.l7  | 0.65828  | 0.27677    | 2.378   | 0.019064 | *   |
| ee.l7      | -2.69183 | 0.72367    | -3.720  | 0.000312 | *** |
| gasto.l7   | 0.15809  | 0.15558    | 1.016   | 0.311743 |     |
| temp.l7    | -0.41436 | 0.06679    | -6.204  | 9.31e-09 | *** |
| biogas.l8  | 0.26567  | 0.28228    | 0.941   | 0.348638 |     |
| ee.l8      | -1.32802 | 0.72283    | -1.837  | 0.068802 | .   |
| gasto.l8   | -0.14410 | 0.15039    | -0.958  | 0.340019 |     |
| temp.l8    | -0.53377 | 0.06778    | -7.875  | 2.28e-12 | *** |
| biogas.l9  | 0.01527  | 0.27598    | 0.055   | 0.955987 |     |
| ee.l9      | -1.56519 | 0.66292    | -2.361  | 0.019935 | *   |
| gasto.l9   | 0.02092  | 0.14993    | 0.140   | 0.889268 |     |
| temp.l9    | -0.59606 | 0.07356    | -8.103  | 7.00e-13 | *** |
| biogas.l10 | 0.35497  | 0.24121    | 1.472   | 0.143893 |     |
| ee.l10     | -0.97917 | 0.60224    | -1.626  | 0.106762 |     |
| gasto.l10  | 0.01978  | 0.13739    | 0.144   | 0.885768 |     |
| temp.l10   | -0.38266 | 0.08094    | -4.728  | 6.60e-06 | *** |
| const      | 0.04321  | 0.09796    | 0.441   | 0.660028 |     |

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1  
 Residual standard error: 1.167 on 113 degrees of freedom  
 Multiple R-Squared: 0.8872, Adjusted R-squared: 0.8473  
 F-statistic: 22.23 on 40 and 113 DF, p-value: < 2.2e-16

Covariance matrix of residuals:

biogas ee gasto temp

```

biogas 0.2171 0.028099 0.11000 0.113007
ee      0.0281 0.043337 0.07353 -0.006637
gasto  0.1100 0.073526 0.73150 -0.141378
temp   0.1130 -0.006637 -0.14138 1.360982

```

Correlation matrix of residuals:

```

      biogas      ee      gasto      temp
biogas 1.0000 0.28968 0.2760 0.20789
ee      0.2897 1.00000 0.4130 -0.02733
gasto  0.2760 0.41296 1.0000 -0.14169
temp   0.2079 -0.02733 -0.1417 1.00000

```

### **PRUEBA PORTMANTEAU PARA DETERMINAR AUTOCORRELACIÓN**

Se realiza prueba Portmanteau con el fin de verificar que los residuales no cuenten con autocorrelación, observándose que el valor de p-value es menor a 0.05, por lo que pudiera existir autocorrelación, sin embargo, pudiera verse afectado dado que los datos de las variables se encuentran muy dispersos.

```

      Portmanteau Test (multivariate)
data:  Residuals of VAR object model.var
Chi-squared = 65.63, df = 0, p-value < 2.2e-16

```

### **PRUEBA ARCH PARA DETERMINAR PRESENCIA DE HETEROCEDASTICIDAD**

Se realiza prueba arch con el fin de verificar que la presencia de heterocedasticidad, observándose que el valor de p-value es mayor a 0.05, lo cual quiere decir que el modelo está bien ya que no sufre de heterocedasticidad

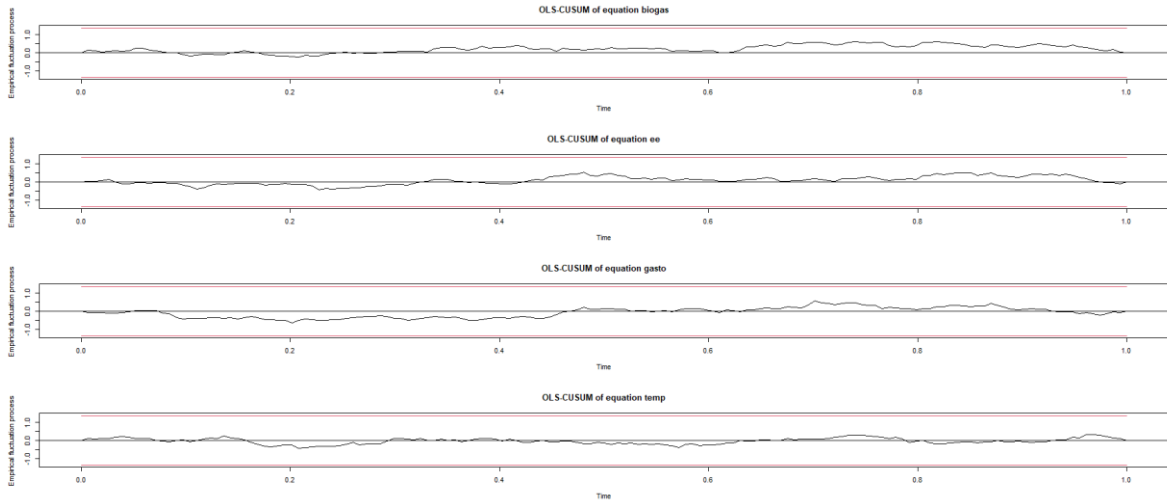
```

      ARC TEST
data:  Residuals of VAR object model.var
Chi-squared = 1390, df = 1500, p-value = 0.9797

```

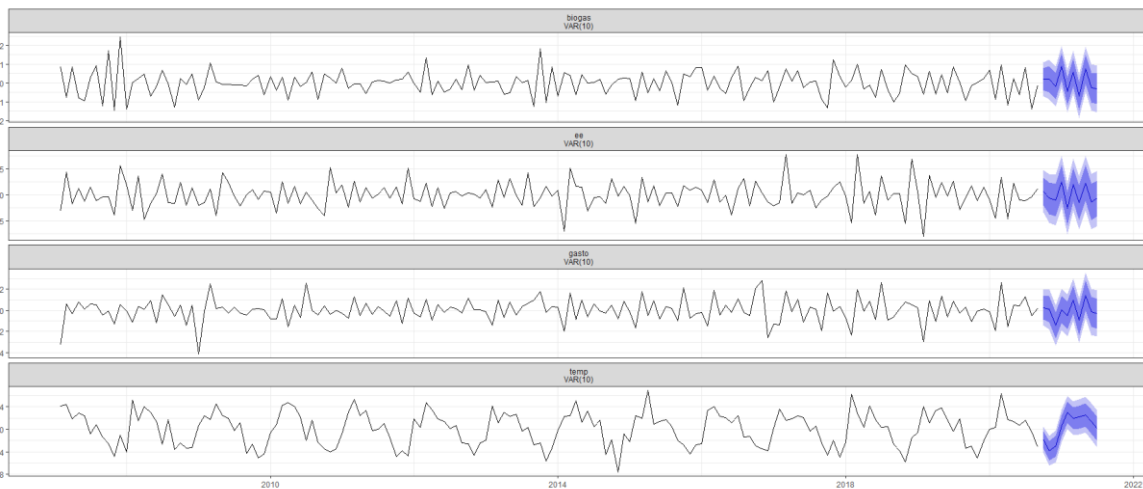
### **PRUEBA DE ESTABILIDAD**

Se realiza la prueba de estabilidad de la cual se puede ver que no existe ninguna ruptura estructural ya que ningún punto sale de los límites superiores e inferiores, los cuales están indicados por las líneas punteadas rojas, por lo que el sistema es estable.



### FORECAST MODELO VAR

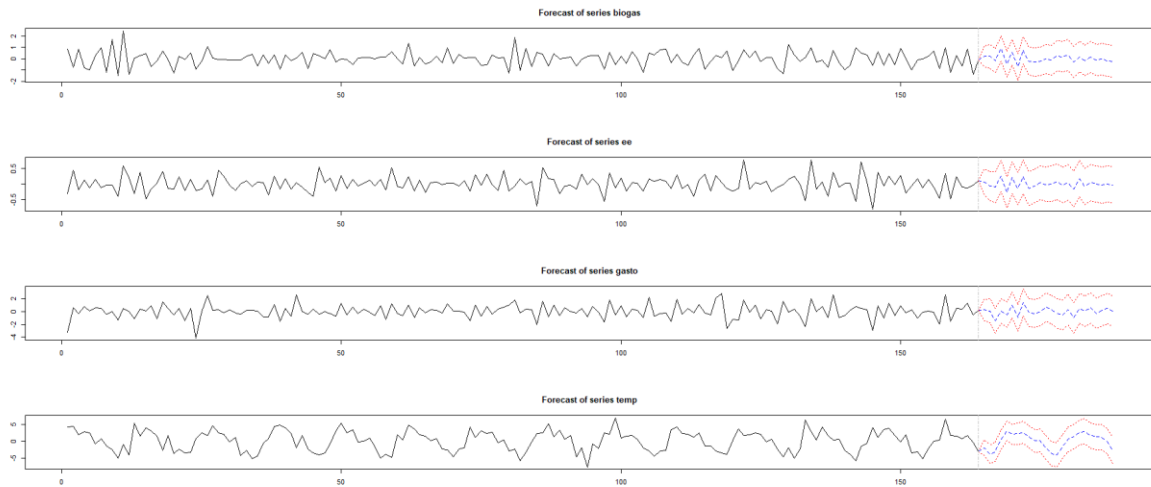
Se realiza un forecast para cada una de las variables que conforman el modelo Var que se está trabajando a un horizonte de 10 meses, en el que se observa un patrón de comportamiento de las variables similar a las últimas observaciones. La zona sombreada de azul oscuro corresponde a un intervalo de confianza del 80% y la zona sombreada de azul claro corresponde a uno de 95%.



### FORECAST A 24 MESES DEL MODELO VAR

Se realiza un forecast para cada una de las variables que conforman el modelo Var que se está trabajando a un horizonte de 24 meses que es el que se ha estado utilizando en este trabajo de

investigación, en el que se observa un patrón de comportamiento de las variables similar a las últimas observaciones en los primeros 10 meses, después se observa como el pronóstico se va haciendo más horizontal en las variables biogás, energía eléctrica y gasto. La línea azul corresponde al pronóstico y las líneas rojas corresponden a los límites de los intervalos de confianza.



## SIMULACIÓN GRANGER CAUSALITY

La simulación Granger Causality permite ver si existe una asociación entre las variables, por lo que para la planta “Dulces Nombres” tenemos que:

- La generación de biogás tiene correlación con el consumo de energía eléctrica, cantidad de agua tratada ni temperatura, ya que el valor de p-value es menor a 0.05.
- El consumo de energía eléctrica tiene correlación con la cantidad de agua tratada, temperatura ni la generación de biogás, ya que el valor de p-value es menor a 0.05.
- El agua tratada no tiene correlación con el consumo de energía eléctrica, temperatura y generación de biogás, ya que el valor de p-value es mayor a 0.05.
- La temperatura no tiene correlación con el consumo de energía eléctrica, cantidad de agua tratada y generación de biogás, ya que el valor de p-value es mayor a 0.05

### BIOGAS

```
Granger causality H0: biogas do not Granger-cause ee gasto temp
data: VAR object model.var
F-Test = 1.5404, df1 = 30, df2 = 452, p-value = 0.03585
$Instant
```

```
H0: No instantaneous causality between: biogas and ee gasto temp
data: VAR object model.var
Chi-squared = 22.65, df = 3, p-value = 4.776e-05
```

### ENERGÍA ELÉCTRICA

Granger causality H0: ee do not Granger-cause biogas gasto temp  
 data: VAR object model.var  
 F-Test = 2.0235, df1 = 30, df2 = 452, p-value = 0.00132  
 \$Instant  
 H0: No instantaneous causality between: ee and biogas gasto temp  
 data: VAR object model.var  
 Chi-squared = 26.116, df = 3, p-value = 9.017e-06

#### AGUA TRATADA

Granger causality H0: gasto do not Granger-cause biogas ee temp  
 data: VAR object model.var  
 F-Test = 1.3248, df1 = 30, df2 = 452, p-value = 0.12  
 \$Instant  
 H0: No instantaneous causality between: gasto and biogas ee temp  
 data: VAR object model.var  
 Chi-squared = 28.463, df = 3, p-value = 2.904e-06

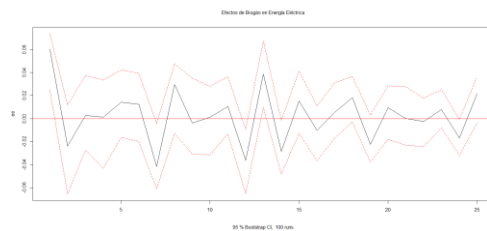
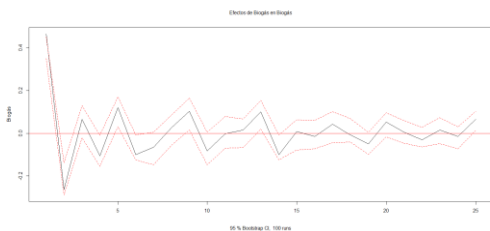
#### TEMPERATURA

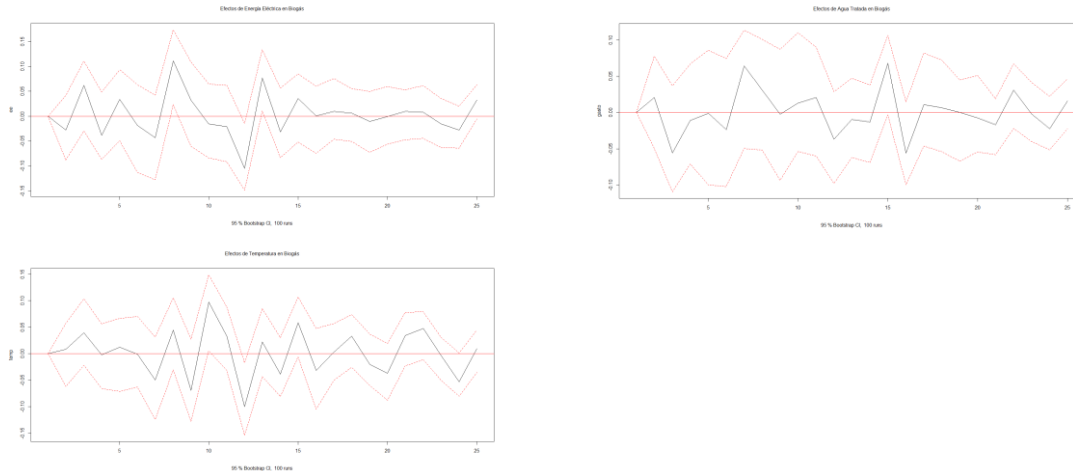
Granger causality H0: temp do not Granger-cause biogas ee gasto  
 data: VAR object model.var  
 F-Test = 1.3129, df1 = 30, df2 = 452, p-value = 0.1275  
 \$Instant  
 H0: No instantaneous causality between: temp and biogas ee gasto  
 data: VAR object model.var  
 Chi-squared = 12.251, df = 3, p-value = 0.006571

### EFFECTOS EN OTRAS VARIABLES SIMULACIÓN “IMPULSE RESPONSE FUNCTIONS”

La simulación “Impulse Response Functions”, nos permite observar que a lo largo de los 24 meses que corresponde el horizonte de estudio, las variables tienen efectos sobre otras variables, entre las que encontramos:

- El biogás se afecta a sí mismo, como al consumo de la energía eléctrica
- La energía eléctrica afecta a la producción de biogás
- El agua tratada afecta a la producción de biogás
- La temperatura afecta a la producción de biogás





## IMPACTO EN EL BIOGÁS

Se realiza el impacto en el biogás obteniendo siguientes resultados, en los cuales, entre mayor sea el número, mayor es la afectación de la variable biogás en la variable que se observa en cada columna:

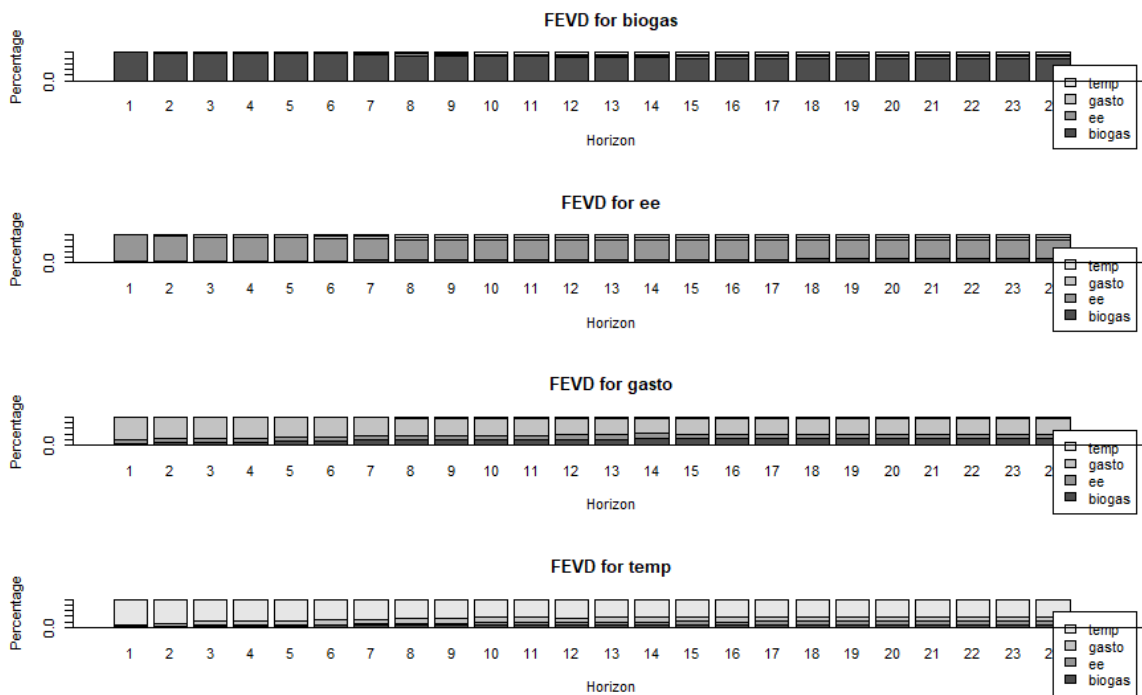
|       | biogas    | ee          | gasto       | temp         |
|-------|-----------|-------------|-------------|--------------|
| [1,]  | 1.0000000 | 0.000000000 | 0.000000000 | 0.000000000  |
| [2,]  | 0.9955676 | 0.002736368 | 0.001453484 | 0.0002425497 |
| [3,]  | 0.9675896 | 0.015275722 | 0.011720795 | 0.0054139330 |
| [4,]  | 0.9638563 | 0.019330648 | 0.011609124 | 0.0052038830 |
| [5,]  | 0.9616473 | 0.021874290 | 0.011049290 | 0.0054291527 |
| [6,]  | 0.9601811 | 0.022202416 | 0.012358516 | 0.0052579843 |
| [7,]  | 0.9377262 | 0.026677843 | 0.023539614 | 0.0120563417 |
| [8,]  | 0.8989366 | 0.059007004 | 0.025139765 | 0.0169165884 |
| [9,]  | 0.8881166 | 0.059126031 | 0.024065473 | 0.0286919144 |
| [10,] | 0.8680759 | 0.057253867 | 0.023486294 | 0.0511839010 |
| [11,] | 0.8638135 | 0.058084183 | 0.024435570 | 0.0536667441 |
| [12,] | 0.8186988 | 0.080613640 | 0.026353343 | 0.0743342204 |
| [13,] | 0.8108890 | 0.090920725 | 0.025568848 | 0.0726213945 |
| [14,] | 0.8103404 | 0.090541738 | 0.025238404 | 0.0738794372 |
| [15,] | 0.7941540 | 0.091432304 | 0.034621109 | 0.0797925875 |
| [16,] | 0.7872512 | 0.090585253 | 0.040976701 | 0.0811868007 |
| [17,] | 0.7877214 | 0.090377591 | 0.041049473 | 0.0808515740 |
| [18,] | 0.7858002 | 0.090211536 | 0.041034249 | 0.0829539747 |
| [19,] | 0.7860633 | 0.089897227 | 0.040778271 | 0.0832611615 |
| [20,] | 0.7849497 | 0.089119678 | 0.040547849 | 0.0853827996 |
| [21,] | 0.7824585 | 0.089024115 | 0.040997868 | 0.0875195310 |
| [22,] | 0.7776235 | 0.088383791 | 0.042625606 | 0.0913670636 |
| [23,] | 0.7773074 | 0.088804477 | 0.042588852 | 0.0912992403 |
| [24,] | 0.7709669 | 0.089582467 | 0.043258019 | 0.0961926152 |

- Donde para el mes 1 el 100% es biogás vs biogás.
- Para el mes 6 el 96.4% es biogás, el 2.1% es energía eléctrica, el 1% es agua tratada y el .5% es temperatura



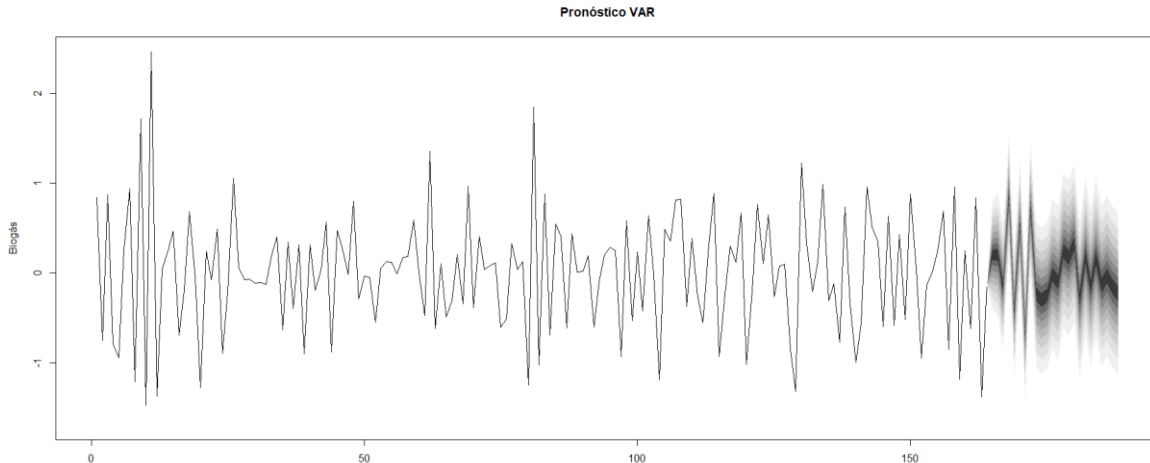
- Para el mes 12 el 82% es biogás, el 8% es energía eléctrica, el 3% es agua tratada y el 7% es temperatura
- Para el mes 18 el 79% es biogás, el 9% es energía eléctrica, el 4% es agua tratada y el 8% es temperatura
- Para el mes 24 el 77% es biogás, el 9% es energía eléctrica, el 4% es agua tratada y el 10% es temperatura

De forma gráfica los impactos que tienen las variables en las demás se observa así:



## PRONÓSTICO VAR

Por último se obtiene el pronóstico de nuestro modelo VAR para el biogás, en el cual se puede observar que el comportamiento del biogás se va a mantener constante a los valores proyectados en los periodos pasados, esto en el horizonte de 24 meses con una certidumbre del 95%



## PLANTA "NORTE"

### PRUEBA DICKEY-FULLER PARA DETERMINAR ESTACIONARIEDAD

Los valores de p-value para la energía eléctrica, agua tratada y biogás son menores a 0.05, por lo que las variables son estacionarias y no requieren ser defenciadadas.

|                                                                                                                                         |                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ENERGÍA ELÉCTRICA</b><br>data: ee<br>Dickey-Fuller = -3.9111, Lag order = 5, p-value = 0.01528<br>alternative hypothesis: stationary | <b>AGUA TRATADA</b><br>data: gasto<br>Dickey-Fuller = -4.482, Lag order = 5, p-value = 0.01<br>alternative hypothesis: stationary |
| <b>BIOGAS</b><br>data: biogas<br>Dickey-Fuller = -3.5784, Lag order = 5, p-value = 0.03739<br>alternative hypothesis: stationary        | <b>TEMPERATURA</b><br>data: temp<br>Dickey-Fuller = -9.7274, Lag order = 5, p-value = 0.01<br>alternative hypothesis: stationary  |

### ORDEN DE REZAGO

| AIC(n) | HQ(n) | SC(n) | FPE(n) |
|--------|-------|-------|--------|
| 15     | 3     | 2     | 7      |

### MODELO VAR

A continuación, se muestran los resultados de la estimación del sistema VAR usando un orden de rezago de 3, mostrando los resultados para cada una de las ecuaciones correspondientes a las variables que se están analizando, así como la matriz de covarianza y correlación de los residuales.

#### VAR Estimation Results:

```

=====
Endogenous variables: biogas, ee, gasto, temp
Deterministic variables: const
Sample size: 162
Log Likelihood: -313.324
Roots of the characteristic polynomial:
0.9562 0.9562 0.9315 0.8692 0.6577 0.6452 0.4663 0.4663 0.3953 0.3953 0.1741
0.03592
Call:
VAR(y = v1, p = 3, type = "const", exogen = NULL)

```

#### Estimation results for equation biogas:

```
=====
```

biogas = biogas.l1 + ee.l1 + gasto.l1 + temp.l1 + biogas.l2 + ee.l2 + gasto.l2 + temp.l2 + biogas.l3 + ee.l3 + gasto.l3 + temp.l3 + const

|           | Estimate  | Std. Error | t value | Pr(> t ) |     |
|-----------|-----------|------------|---------|----------|-----|
| biogas.l1 | 0.432617  | 0.097826   | 4.422   | 1.87e-05 | *** |
| ee.l1     | 0.026050  | 0.171372   | 0.152   | 0.8794   |     |
| gasto.l1  | 0.062646  | 0.067183   | 0.932   | 0.3526   |     |
| temp.l1   | 0.007142  | 0.011104   | 0.643   | 0.5211   |     |
| biogas.l2 | 0.153695  | 0.105058   | 1.463   | 0.1456   |     |
| ee.l2     | -0.033910 | 0.211847   | -0.160  | 0.8730   |     |
| gasto.l2  | 0.069448  | 0.077865   | 0.892   | 0.3739   |     |
| temp.l2   | -0.017330 | 0.017327   | -1.000  | 0.3188   |     |
| biogas.l3 | 0.198802  | 0.096292   | 2.065   | 0.0407   | *   |
| ee.l3     | 0.150683  | 0.177343   | 0.850   | 0.3969   |     |
| gasto.l3  | -0.098780 | 0.061614   | -1.603  | 0.1110   |     |
| temp.l3   | 0.010182  | 0.011038   | 0.922   | 0.3578   |     |
| const     | -0.056994 | 0.234662   | -0.243  | 0.8084   |     |

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2835 on 149 degrees of freedom  
Multiple R-Squared: 0.7214, Adjusted R-squared: 0.699  
F-statistic: 32.16 on 12 and 149 DF, p-value: < 2.2e-16

Estimation results for equation ee:

=====

ee = biogas.l1 + ee.l1 + gasto.l1 + temp.l1 + biogas.l2 + ee.l2 + gasto.l2 + temp.l2 + biogas.l3 + ee.l3 + gasto.l3 + temp.l3 + const

|           | Estimate  | Std. Error | t value | Pr(> t ) |     |
|-----------|-----------|------------|---------|----------|-----|
| biogas.l1 | 0.011867  | 0.067569   | 0.176   | 0.8608   |     |
| ee.l1     | 0.544573  | 0.118368   | 4.601   | 8.94e-06 | *** |
| gasto.l1  | -0.015850 | 0.046404   | -0.342  | 0.7332   |     |
| temp.l1   | 0.003813  | 0.007669   | 0.497   | 0.6198   |     |
| biogas.l2 | -0.037389 | 0.072564   | -0.515  | 0.6071   |     |
| ee.l2     | 0.011240  | 0.146324   | 0.077   | 0.9389   |     |
| gasto.l2  | 0.083963  | 0.053782   | 1.561   | 0.1206   |     |
| temp.l2   | -0.013776 | 0.011967   | -1.151  | 0.2515   |     |
| biogas.l3 | 0.066814  | 0.066509   | 1.005   | 0.3167   |     |
| ee.l3     | 0.264064  | 0.122492   | 2.156   | 0.0327   | *   |
| gasto.l3  | -0.074458 | 0.042557   | -1.750  | 0.0822   | .   |
| temp.l3   | 0.006290  | 0.007624   | 0.825   | 0.4107   |     |
| const     | 0.376864  | 0.162082   | 2.325   | 0.0214   | *   |

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1958 on 149 degrees of freedom  
Multiple R-Squared: 0.6233, Adjusted R-squared: 0.593  
F-statistic: 20.55 on 12 and 149 DF, p-value: < 2.2e-16

Estimation results for equation gasto:

=====

gasto = biogas.l1 + ee.l1 + gasto.l1 + temp.l1 + biogas.l2 + ee.l2 + gasto.l2 + temp.l2 + biogas.l3 + ee.l3 + gasto.l3 + temp.l3 + const

|           | Estimate  | Std. Error | t value | Pr(> t ) |     |
|-----------|-----------|------------|---------|----------|-----|
| biogas.l1 | 0.277936  | 0.186345   | 1.492   | 0.13794  |     |
| ee.l1     | -0.611303 | 0.326441   | -1.873  | 0.06308  | .   |
| gasto.l1  | 0.576331  | 0.127975   | 4.503   | 1.34e-05 | *** |
| temp.l1   | 0.029585  | 0.021151   | 1.399   | 0.16398  |     |
| biogas.l2 | 0.078294  | 0.200120   | 0.391   | 0.69618  |     |
| ee.l2     | -0.341194 | 0.403541   | -0.846  | 0.39919  |     |
| gasto.l2  | 0.265139  | 0.148323   | 1.788   | 0.07588  | .   |
| temp.l2   | -0.016269 | 0.033005   | -0.493  | 0.62279  |     |
| biogas.l3 | 0.189667  | 0.183423   | 1.034   | 0.30279  |     |
| ee.l3     | 0.571126  | 0.337815   | 1.691   | 0.09299  | .   |
| gasto.l3  | -0.175031 | 0.117366   | -1.491  | 0.13799  |     |

```
temp.l3 -0.003778 0.021026 -0.180 0.85763
const 1.443938 0.446999 3.230 0.00152 **
---
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Residual standard error: 0.54 on 149 degrees of freedom  
Multiple R-Squared: 0.6955, Adjusted R-squared: 0.671  
F-statistic: 28.37 on 12 and 149 DF, p-value: < 2.2e-16

Estimation results for equation temp:

```
=====
temp = biogas.l1 + ee.l1 + gasto.l1 + temp.l1 + biogas.l2 + ee.l2 + gasto.l2 +
temp.l2 + biogas.l3 + ee.l3 + gasto.l3 + temp.l3 + const
```

|           | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t )     |
|-----------|----------|------------|---------|--------------|
| biogas.l1 | -0.85590 | 0.59257    | -1.444  | 0.151        |
| ee.l1     | -1.05229 | 1.03808    | -1.014  | 0.312        |
| gasto.l1  | 0.22180  | 0.40696    | 0.545   | 0.587        |
| temp.l1   | 0.97387  | 0.06726    | 14.479  | < 2e-16 ***  |
| biogas.l2 | 0.11397  | 0.63638    | 0.179   | 0.858        |
| ee.l2     | -0.01567 | 1.28325    | -0.012  | 0.990        |
| gasto.l2  | 0.17349  | 0.47166    | 0.368   | 0.714        |
| temp.l2   | 0.14279  | 0.10495    | 1.361   | 0.176        |
| biogas.l3 | 0.38616  | 0.58328    | 0.662   | 0.509        |
| ee.l3     | 1.81642  | 1.07425    | 1.691   | 0.093 .      |
| gasto.l3  | -0.34457 | 0.37322    | -0.923  | 0.357        |
| temp.l3   | -0.59093 | 0.06686    | -8.838  | 2.53e-15 *** |
| const     | 9.58983  | 1.42145    | 6.747   | 3.14e-10 *** |

```
---
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Residual standard error: 1.717 on 149 degrees of freedom  
Multiple R-Squared: 0.892, Adjusted R-squared: 0.8833  
F-statistic: 102.5 on 12 and 149 DF, p-value: < 2.2e-16

Covariance matrix of residuals:

|        | biogas  | ee      | gasto   | temp    |
|--------|---------|---------|---------|---------|
| biogas | 0.08035 | 0.02451 | 0.08498 | 0.12566 |
| ee     | 0.02451 | 0.03833 | 0.07757 | 0.04213 |
| gasto  | 0.08498 | 0.07757 | 0.29156 | 0.12962 |
| temp   | 0.12566 | 0.04213 | 0.12962 | 2.94832 |

Correlation matrix of residuals:

|        | biogas | ee     | gasto  | temp   |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| biogas | 1.0000 | 0.4416 | 0.5552 | 0.2582 |
| ee     | 0.4416 | 1.0000 | 0.7337 | 0.1253 |
| gasto  | 0.5552 | 0.7337 | 1.0000 | 0.1398 |
| temp   | 0.2582 | 0.1253 | 0.1398 | 1.0000 |

## PRUEBA PORTMANTEAU PARA DETERMINAR AUTOCORRELACIÓN

Se realiza prueba Portmanteau con el fin de verificar que los residuales no cuenten con autocorrelación, observándose que el valor de p-value es menor a 0.05, por lo que pudiera existir autocorrelación, sin embargo, pudiera verse afectado dado que los datos de las variables se encuentran muy dispersos.

```
Portmanteau Test (multivariate)
data: Residuals of VAR object model.var
Chi-squared = 144.34, df = 112, p-value = 0.0214
```

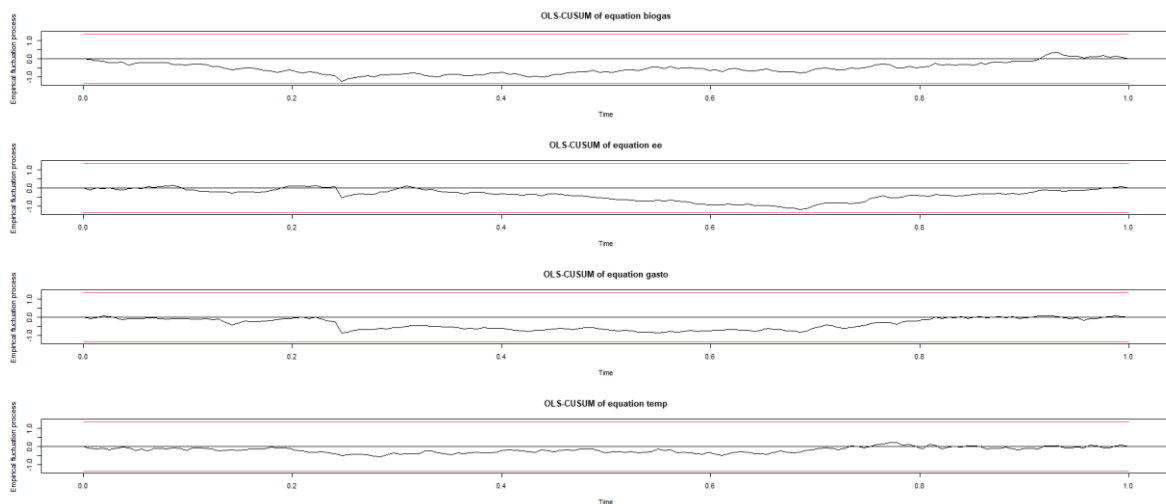
## PRUEBA ARCH PARA DETERMINAR PRESENCIA DE HETEROCEDASTICIDAD

Se realiza prueba arch con el fin de verificar que la presencia de heterocedasticidad, observándose que el valor de p-value es mayor a 0.05, lo cual quiere decir que el modelo está bien ya que no sufre de heterocedasticidad

```
ARC TEST
data: Residuals of VAR object model.var
Chi-squared = 1470, df = 1500, p-value = 0.7051
```

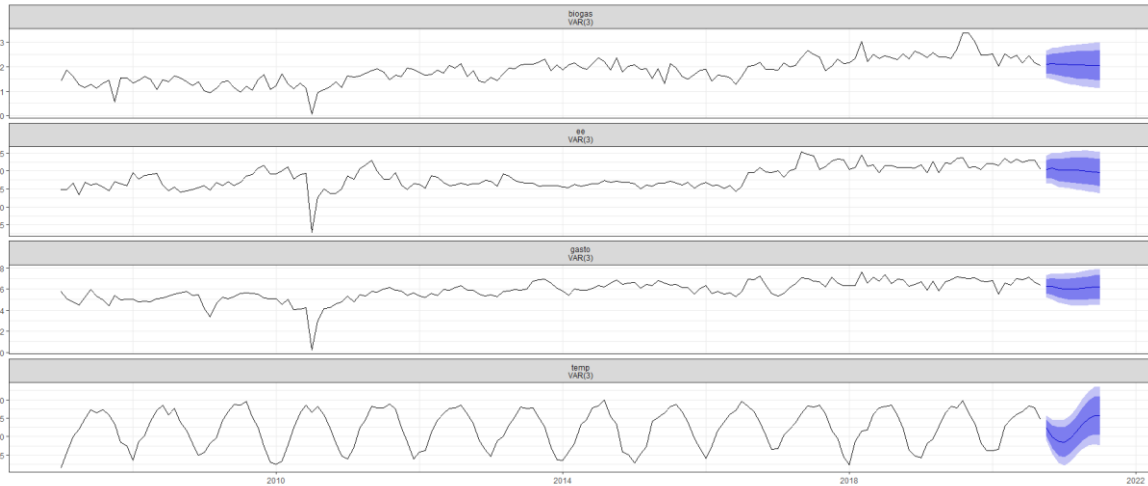
## PRUEBA DE ESTABILIDAD

Se realiza la prueba de estabilidad de la cual se puede ver que no existe ninguna ruptura estructural ya que ningún punto sale de los límites superiores e inferiores, los cuales están indicados por las líneas punteadas rojas, por lo que el sistema es estable.



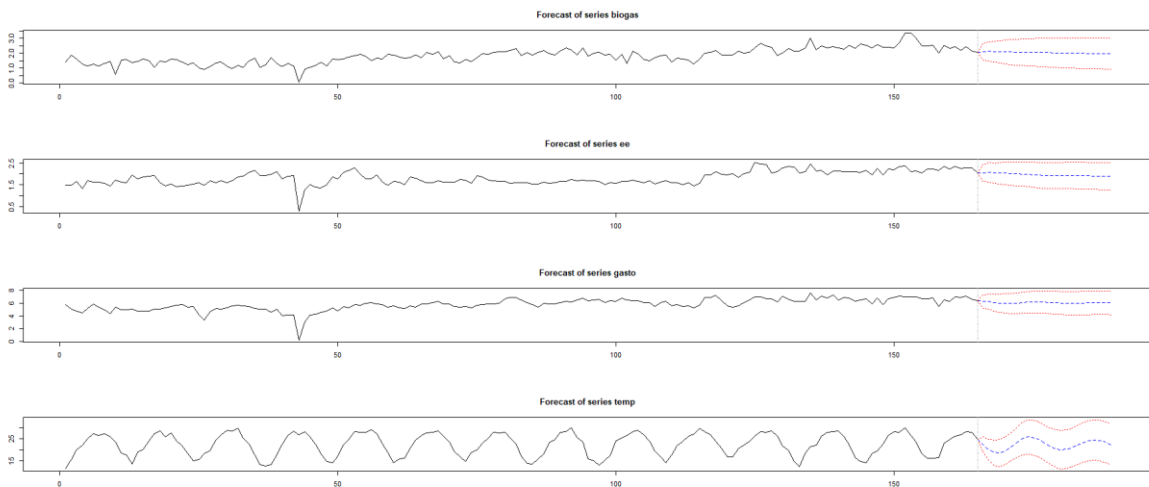
## FORECAST MODELO VAR

Se realiza un forecast para cada una de las variables que conforman el modelo Var que se está trabajando a un horizonte de 10 meses, en el que se observa un patrón de comportamiento descendente para las variables generación de biogás y energía eléctrica consumida, mientras que el agua tratada tiene un comportamiento de crecimiento mínimo. La zona sombreada de azul oscuro corresponde a un intervalo de confianza del 80% y la zona sombreada de azul claro corresponde a uno de 95%.



### FORECAST A 24 MESES DEL MODELO VAR

Se realiza un forecast para cada una de las variables que conforman el modelo Var que se está trabajando a un horizonte de 24 meses que es el que se ha estado utilizando en este trabajo de investigación, en el que se observa un patrón de comportamiento de las variables similar a las últimas observaciones en los primeros 10 meses, después se observa como el pronóstico tiene comportamiento descendente para las variables generación de biogás y energía eléctrica consumida, mientras que el agua tratada tiene un comportamiento de crecimiento mínimo.



## SIMULACIÓN GRANGER CAUSALITY

La simulación Granger Causality permite ver si existe una asociación entre las variables, por lo que para la planta “Dulces Nombres” tenemos que:

- La generación de biogás no tiene correlación con el consumo de energía eléctrica, cantidad de agua tratada ni temperatura, ya que el valor de p-value es mayor a 0.05.
- El consumo de energía eléctrica tiene correlación con la cantidad de agua tratada, temperatura ni la generación de biogás, ya que el valor de p-value es menor a 0.05.
- El agua tratada no tiene correlación con el consumo de energía eléctrica, temperatura y generación de biogás, ya que el valor de p-value es mayor a 0.05.
- La temperatura tiene correlación con el consumo de energía eléctrica, cantidad de agua tratada y generación de biogás, ya que el valor de p-value es menor a 0.05

### BIOGAS

```
Granger causality H0: biogas do not Granger-cause ee gasto temp
data: VAR object model.var
F-Test = 1.8166, df1 = 9, df2 = 596, p-value = 0.06235
$Instant
H0: No instantaneous causality between: biogas and ee gasto temp
data: VAR object model.var
Chi-squared = 41.42, df = 3, p-value = 5.328e-09
```

### ENERGÍA ELÉCTRICA

```
Granger causality H0: ee do not Granger-cause biogas gasto temp
data: VAR object model.var
F-Test = 2.42, df1 = 9, df2 = 596, p-value = 0.01054
$Instant
H0: No instantaneous causality between: ee and biogas gasto temp
data: VAR object model.var
Chi-squared = 56.822, df = 3, p-value = 2.805e-12
```

### AGUA TRATADA

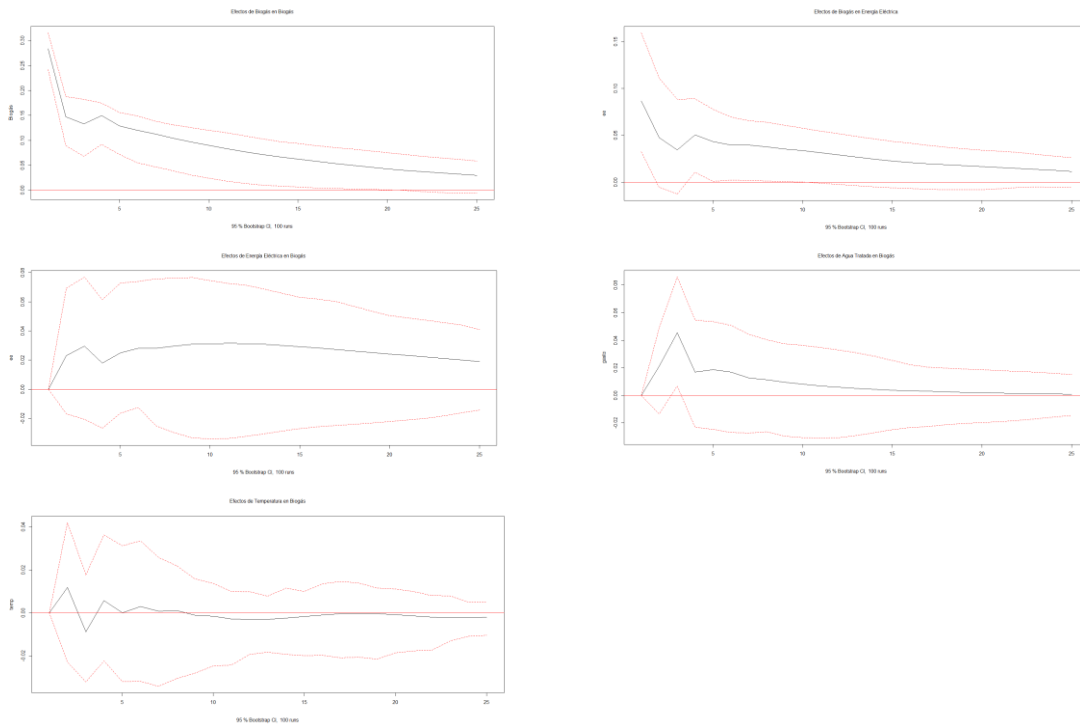
```
Granger causality H0: gasto do not Granger-cause biogas ee temp
data: VAR object model.var
F-Test = 0.70576, df1 = 9, df2 = 596, p-value = 0.7039
$Instant
H0: No instantaneous causality between: gasto and biogas ee temp
data: VAR object model.var
Chi-squared = 61.057, df = 3, p-value = 3.494e-13
```

### TEMPERATURA

```
Granger causality H0: temp do not Granger-cause biogas ee gasto
data: VAR object model.var
F-Test = 2.5888, df1 = 9, df2 = 596, p-value = 0.006221
$Instant
H0: No instantaneous causality between: temp and biogas ee gasto
data: VAR object model.var
Chi-squared = 10.185, df = 3, p-value = 0.01706
```

## EFFECTOS EN OTRAS VARIABLES SIMULACIÓN “IMPULSE RESPONSE FUNCTIONS”

La simulación “Impulse Response Functions”, nos permite observar que a lo largo de los 24 meses que corresponde el horizonte de estudio, las variables tienen efecto sobre otras variables, entre las que encontramos:



## IMPACTO EN EL BIOGÁS

Se realiza el impacto en el biogás obteniendo siguientes resultados, en los cuales, entre mayor sea el número, mayor es la afectación de la variable biogás en la variable que se observa en cada columna:

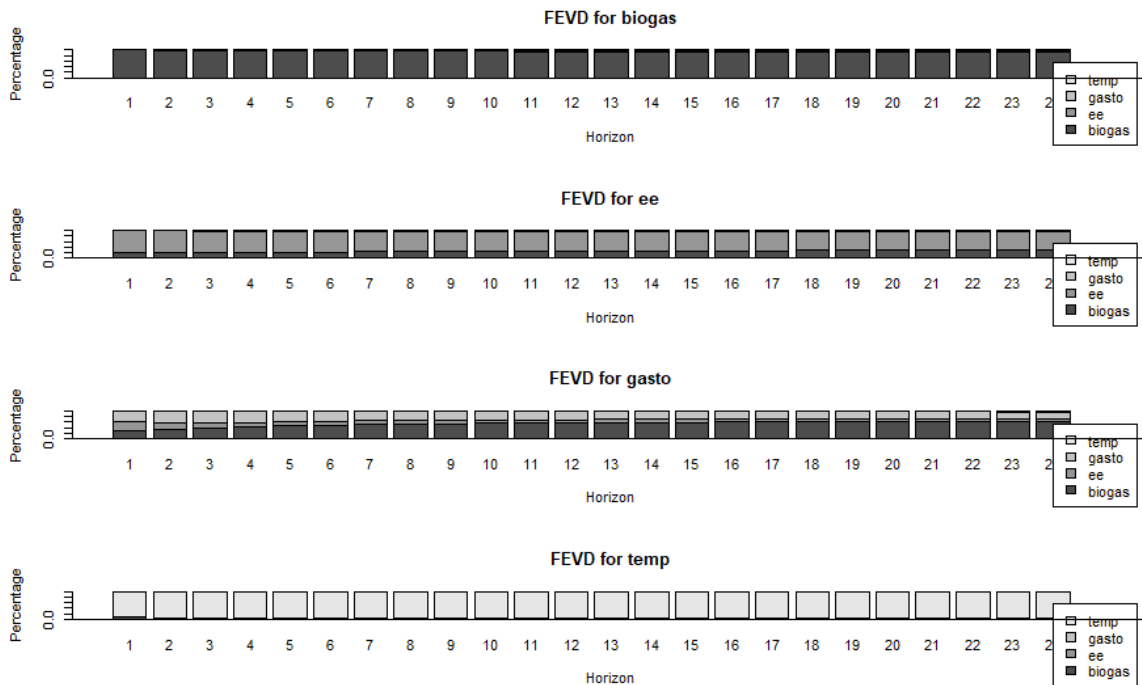
|       | biogas    | ee          | gasto       | temp        |
|-------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| [1,]  | 1.0000000 | 0.00000000  | 0.00000000  | 0.00000000  |
| [2,]  | 0.9891312 | 0.005200791 | 0.004306167 | 0.001361799 |
| [3,]  | 0.9664039 | 0.011456698 | 0.020373676 | 0.001765717 |
| [4,]  | 0.9672830 | 0.011876489 | 0.019134536 | 0.001705956 |
| [5,]  | 0.9648645 | 0.014408006 | 0.019203301 | 0.001524164 |
| [6,]  | 0.9618494 | 0.017579242 | 0.019129373 | 0.001441993 |
| [7,]  | 0.9596218 | 0.020415149 | 0.018620111 | 0.001342984 |
| [8,]  | 0.9570429 | 0.023502669 | 0.018183402 | 0.001271031 |
| [9,]  | 0.9542585 | 0.026787489 | 0.017738636 | 0.001215364 |
| [10,] | 0.9514891 | 0.030016978 | 0.017316547 | 0.001177415 |
| [11,] | 0.9486550 | 0.033238076 | 0.016934284 | 0.001172659 |
| [12,] | 0.9458849 | 0.036350289 | 0.016589228 | 0.001175630 |
| [13,] | 0.9432216 | 0.039312597 | 0.016282016 | 0.001183763 |
| [14,] | 0.9407214 | 0.042085846 | 0.016011778 | 0.001181012 |



|       |           |             |             |             |
|-------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| [15,] | 0.9383960 | 0.044658556 | 0.015774837 | 0.001170627 |
| [16,] | 0.9362521 | 0.047024587 | 0.015567993 | 0.001155286 |
| [17,] | 0.9342757 | 0.049196663 | 0.015387519 | 0.001140160 |
| [18,] | 0.9324548 | 0.051188476 | 0.015229924 | 0.001126844 |
| [19,] | 0.9307743 | 0.053017640 | 0.015092044 | 0.001116013 |
| [20,] | 0.9292224 | 0.054697443 | 0.014971150 | 0.001109013 |
| [21,] | 0.9277889 | 0.056237939 | 0.014864947 | 0.001108226 |
| [22,] | 0.9264693 | 0.057644558 | 0.014771591 | 0.001114558 |
| [23,] | 0.9252636 | 0.058920763 | 0.014689601 | 0.001126058 |
| [24,] | 0.9241745 | 0.060069460 | 0.014617767 | 0.001138232 |

- Donde para el mes 1 el 100% es biogás vs biogás.
- Para el mes 6 el 96% es biogás, el 1.8% es energía eléctrica, el 2% es agua tratada y el .2% es temperatura
- Para el mes 12 el 94.6% es biogás, el 3.6% es energía eléctrica, el 1.6% es agua tratada y el 0.2% es temperatura
- Para el mes 18 el 93.2% es biogás, el 5.2% es energía eléctrica, el 1.5% es agua tratada y el 0.1% es temperatura
- Para el mes 24 el 92.4% es biogás, el 6% es energía eléctrica, el 1.4% es agua tratada y el 0.2% es temperatura

De forma gráfica los impactos que tienen las variables en las demás se observa así:



## PRONÓSTICO VAR

Por último se obtiene el pronóstico de nuestro modelo VAR para el biogás, en el cual se puede observar que el comportamiento del biogás se va a mantener constante, por lo que se puede definir que para esta planta este modelo no es el idóneo.

