



## IV-Landeros-Chile-1

### MODELACIÓN OPERACIONAL DE DIGESTORES EN PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS.

**Edson Landeros P <sup>(1)</sup>.**

Ingeniero Civil con 3 años en el Grupo Aguas, actualmente posee el cargo de Jefe de la Unidad de Soporte Técnico desarrollando tareas de apoyo técnico de carácter transversal y estratégico.

**Joaquín Martí M.**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos con 19 años en el Grupo Agbar, su cargo actual corresponde a Secretario Técnico de Aguas Andinas.

**Miguel Saavedra L.**

Egresado de Ingeniería Civil, actualmente desempeña el cargo de Ingeniero Trainee en el Grupo Aguas.

**Dr. Gonzalo Ruiz F.**

Profesor Asociado de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Doctor por la Universidad de Santiago de Compostela, miembro de AIDIS-Chile.

**Dr. Rolando Chamy.**

Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Doctor por la Universidad de Santiago de Compostela, miembro de AIDIS-Chile.

**Luis Pulgar.**

Licenciado en ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Bioquímica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

**Dirección (1):** Avenida Presidente Balmaceda 1398, Piso 12 - Santiago – Región Metropolitana - 8340083 - Chile - Tel.: (+56) 02 496 2931 - Fax: (+56) 02 496 2931 - e-mail: [elanderos@aguasandinas.cl](mailto:elanderos@aguasandinas.cl).

#### RESUMEN.

El objetivo del trabajo se orienta al desarrollo de un modelo matemático de digestión anaeróbica que simule las principales variables de control del proceso y que permita un uso de carácter explicativo, predictivo y optimizador en la planificación y operación para situaciones normales y particulares de funcionamiento en digestores de 15,000 m<sup>3</sup> pertenecientes a la Planta de Tratamiento La Farfana. El trabajo fue realizado de manera conjunta entre profesionales del Grupo Aguas y la Escuela de Ingeniería Bioquímica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

El modelo utilizado, denominado AM3, corresponde a un proceso de tres etapas: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis, incluyéndose la acción de agentes inhibidores externos. El proceso de calibración se realizó utilizando datos operativos disponibles de la planta para períodos de funcionamiento normal y períodos particulares y apoyándose en algunas experiencias de laboratorio.

Los resultados obtenidos permiten representar de manera satisfactoria y confiable el proceso de digestión dentro de los reactores anaerobios de la planta simulando el comportamiento de las principales variables de control del proceso durante períodos normales y particulares de funcionamiento, esto último utilizando un factor inhibidor de ajuste continuo, resultando de este modo una herramienta altamente flexible a condiciones variables

Finalmente, la confiabilidad del modelo desarrollado permite su aplicabilidad en procesos industriales, utilizándose como una herramienta de apoyo a la operación de procesos dentro de una planta de tratamiento en operación, dejando líneas de acción a corto y mediano plazo que permitan ir mejorando el conocimiento y aplicación de este tipo de desarrollos.

Palabras Clave : **Aguas Residuales, Digestión Anaeróbica, Modelación.**

## 1.- INTRODUCCIÓN.

El Grupo Aguas, principal conglomerado de compañías sanitarias de Chile y que presta servicios de producción y distribución de agua potable y recolección y depuración de aguas residuales para 1.7 millones de clientes en el Gran Santiago, ha impulsado de manera constante la investigación y desarrollo de herramientas robustas y confiables de apoyo a las decisiones operativas. Dentro de la infraestructura de depuración que posee la Compañía se destaca por su magnitud la Planta de Tratamiento La Farfana, con una capacidad máxima de tratamiento de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  y una capacidad media de  $8.8 \text{ m}^3/\text{s}$ , dada la magnitud de inversión asociada a esta obra se hace necesario garantizar una operación normal y desarrollar las herramientas de apoyo a la planificación y operación que minimicen los riesgos asociados y garanticen un manejo eficiente de episodios particulares de funcionamiento, en particular para los procesos de digestión anaeróbica, que destacan por considerarse eficientes en el tratamiento pero susceptibles a vulnerabilidad bajo determinadas condiciones, introduciendo la necesidad de contar con un buen modelo de digestión anaerobia para poder manejar este proceso y controlar la estabilidad del mismo.

De acuerdo a lo anterior, el proceso de digestión anaeróbica de lodos generados en la depuración de aguas residuales constituye un sistema complejo en el cuál intervienen factores biológicos, físicos, químicos e hidráulicos; las líneas de investigación tendientes a mejorar el conocimiento de estos factores y sus relaciones son variadas, multidisciplinarias y aún en desarrollo, lo cuál no ha permitido aún un traspaso eficiente de los avances hacia la operación de estos sistemas manteniéndose en éste último ámbito un carácter empírico en la mayoría de la toma de decisiones.

De este modo, la implementación de estrategias de operación basadas en el conocimiento actual de los procesos de digestión y apoyadas en modelos numéricos de los procesos hidráulicos, físicos y bioquímicos constituye un avance dentro de la línea de establecer procedimientos robustos y eficientes de control del proceso, permitiendo definir criterios de operación en estados normales y determinar estrategias de operación en situación de inestabilidad producidas por agentes externos o internos.

El objetivo principal del trabajo desarrollado se orienta al desarrollo de un modelo matemático de digestión anaeróbica que simule las principales variables que controlan el proceso y que permita su uso en la operación dando respuestas de carácter explicativo, predictivo y de optimización para situaciones normales y particulares de funcionamiento para digestores de  $15,000 \text{ m}^3$  actualmente en funcionamiento en la Planta La Farfana.

El trabajo fue desarrollado de manera conjunta entre el Grupo Aguas y la Escuela de Ingeniería Bioquímica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

## 2.- METODOLOGÍA.

Un modelo matemático consiste en un arreglo de variables y ecuaciones que describen el comportamiento de un determinado evento o proceso. Para poder realizar una correcta modelación se debe tener conocimiento de los fenómenos que participan durante el desarrollo de un determinado proceso y las interacciones que se ejercen entre ellos.

Una vez conocido los fenómenos y sus interacciones el sistema se describe en forma matemática mediante ecuaciones, las cuales al ser desarrolladas por medio de diversas herramientas matemáticas existentes, pueden predecir tanto el comportamiento del sistema en forma global como simplemente la variación de algunos de los parámetros que interviene en el fenómeno que se está modelando.

El desarrollo de un modelo debe realizarse bajo una serie de factores que permitan su desarrollo y posterior implementación, entre los que destacan los siguientes:

- ❑ El modelo debe describir con la mayor exactitud y precisión posible el fenómeno a modelar.
- ❑ El modelo debe ser lo más sencillo tanto en su aplicación como en las herramientas matemáticas que emplea.

- El modelo debe contener el menor número posible de variables y/o parámetros.

Con el fin de modelar correctamente el proceso de digestión anaerobia, se han realizado estudios por más de 3 décadas, tratando de entender y describir la gran cantidad de fenómenos que intervienen en el proceso. En un comienzo para describir el fenómeno de digestión anaerobia se introdujo el modelo de Haldane, por medio del cual se representa el crecimiento celular bajo inhibición por sustrato, este modelo trata de reproducir la inestabilidad del proceso (Andrews,1968).

Los primeros modelos se basan en la existencia de una única población microbiana (Graef and Andrews, 1974) y la representación del proceso se describe por medio de tres etapas: Solubilización de la materia orgánica, acidogénesis y metanogénesis. (Hill y Barth,1977).

Actualmente un grupo de investigadores multidisciplinarios incentivados por la IWA (Internacional Water Association), formuló un modelo que describe el proceso de digestión anaerobia, el cual se conoce como ADM1 (Anaerobic Digestion Model 1), en este modelo interviene 25 variables de estado y más de 100 parámetros, además el modelo posee una alta incertidumbre y dualidad de resultados. Estos factores hacen que este modelo no sea identificable y por tanto inaplicable en el ámbito industrial.

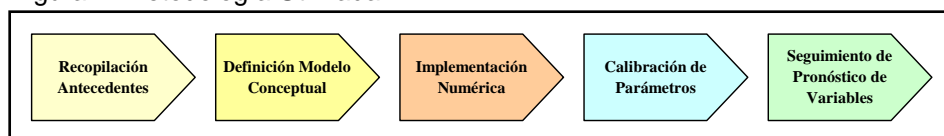
Aunque existen una serie de modelos matemáticos que describen el fenómeno de digestión anaerobia, la gran mayoría posee una seria deficiencia en algunos de los factores que limitan su implementación o desarrollo, esto se puede explicar ya que la mayoría de las modelaciones actuales se basa en el modelo propuesto por la IWA.

Estudios recientes indican que con un modelo de 2 poblaciones se representa el fenómeno de digestión anaerobia, casi en un 95% del sistema (expresado en varianza). Este modelo es conocido como modelo teórico de dos poblaciones (AM2), desarrollado por Bernard et al, (2001). La sencillez de este modelo le impone diversas restricciones dentro de las cuales cabe mencionar la exclusión de una etapa hidrolítica previa en el sistema, la cual en el tratamiento de residuos con un alto contenido de sólidos es indispensable.

Debido a la inaplicabilidad del modelo ADM1 y las limitaciones del modelo AM2. Se desarrollo un nuevo modelo matemático llamado AM3 el cual se basa en la descripción del sistema bajo la acción de dos poblaciones microbianas incluyéndose una etapa hidrolítica y la acción de agentes inhibidores externos.

La metodología utilizada para el desarrollo e implementación de un modelo matemático de digestión anaeróbica de apoyo a la gestión considera las siguientes actividades:

Figura 1: Metodología Utilizada.



## 2.1.- Antecedentes Generales.

La Planta de Tratamiento de Aguas Servidas La Farfana, operativa desde el año 2003, ha sido concebida para tratar las aguas servidas provenientes de la zona central de la ciudad de Santiago de Chile, equivalente a 3.3 millones de habitantes y con un caudal medio de diseño de 8.8 m<sup>3</sup>/s y un máximo instantáneo de 15 m<sup>3</sup>/s.

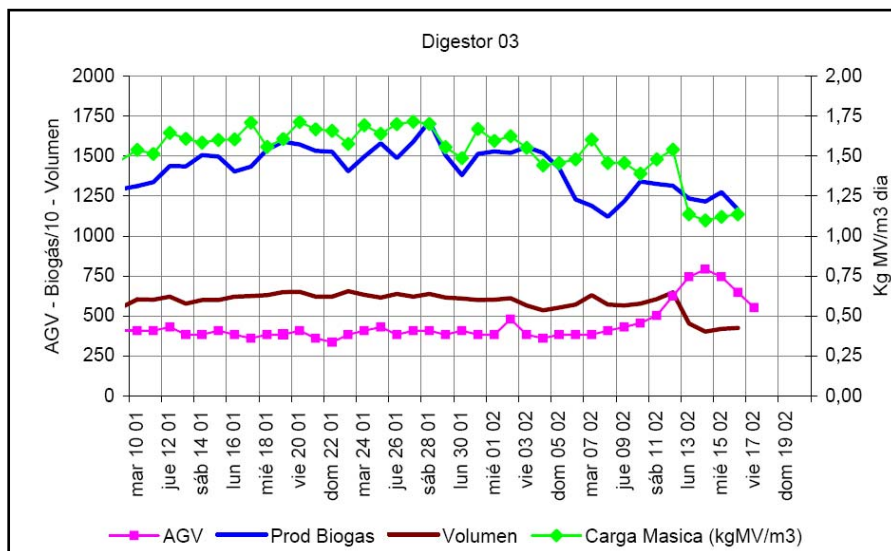
La infraestructura de tratamiento consiste inicialmente en un pozo de gruesos a la entrada, donde se retiran los elementos de mayor tamaño, posteriormente el agua es elevada mediante bombas del tipo Tornillo de Arquímedes donde continua el pretratamiento con el retiro de materiales de tamaños medianos y finos, además de arenas y grasas. Una vez finalizado el pretratamiento las aguas son separadas hidráulicamente en una cámara de repartición en dos flujos y que son medidos en dos canaletas Parshall, los cuales a su vez son nuevamente divididos para alimentar a las cuatro líneas de tratamiento conformadas por cuatro clarificadores primarios, cuatro estanques de aireación, cuatro clarificadores secundarios y un estanque de contacto con cloro cada una.

Los lodos primarios son los residuos de la clarificación primaria los cuales son espesados en cuatro unidades, mientras que los lodos biológicos corresponden a los residuos de los estanques de aireación y de los clarificadores secundarios, éstos son flotados en seis unidades. Ambos procesos, espesamiento y flotación, logran un material con una alta concentración de sólidos, el primero por decantación y el segundo por ascensión de material no precipitable a través de la inyección del lodo mezclado con aire.

Los lodos espesados provenientes de la clarificación primaria y los lodos biológicos resultado del tratamiento en los estanques de aireación y los clarificadores secundarios son mezclados originando los lodos mixtos, los cuales son depurados en 8 digestores anaeróbicos de 15,000 m<sup>3</sup> de capacidad cada uno, para obtener un material inerte que luego es centrifugado para reducir su índice de humedad previo al traslado a su disposición final.

El proceso de digestión anaeróbica ha presentado algunos eventos aislados de funcionamiento fuera de una condición estable, identificables de acuerdo al cambio en los valores normales de las variables de control, principalmente producción de biogás y concentración de ácidos grasos volátiles, que han implicado el cambio en las consignas de operación normales durante un período de tiempo determinado. La ocurrencia de estos episodios ha originado una serie de estudios y desarrollo de mejoras en las prácticas operativas utilizadas. En la figura siguiente se puede observar, para un digestor en particular, las principales variables de control utilizadas y la evolución de ellas durante un período anormal de funcionamiento.

Figura 2: Variables de Seguimiento Operativo.



## 2.2.- Modelo Conceptual e Implementación Numérica.

La digestión anaeróbica ocurre como resultado de un complejo conjunto de reacciones químicas, físicas y bioquímicas, las cuáles ocurren dentro de un ecosistema de diversos tipos de microorganismos, las cuales realizan el indispensable proceso de biotransformación.

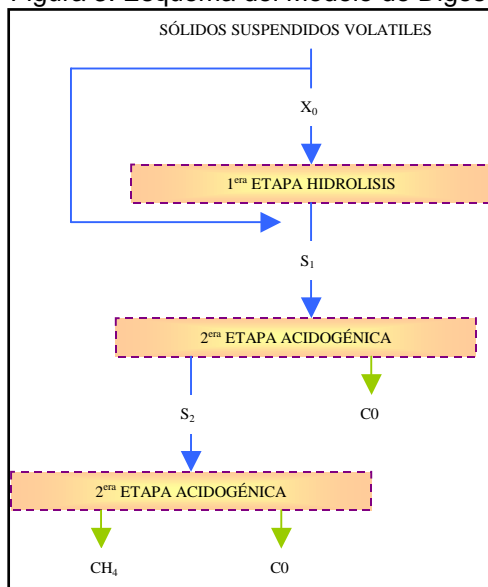
El modelo utilizado, denominado AM3, corresponde a un proceso de tres etapas:

- Etapa de Hidrólisis: los microorganismos producen enzimas que hidrolizan los compuestos orgánicos complejos contenidos en el lodo de alimentación ( $X_0$ ) en compuestos simples solubles ( $S_1$ ) mediante una cinética de primer orden gobernada por la constante de hidrólisis  $K_0$ .
- Etapa de Acidogénesis: se caracteriza por la acción de microorganismos que transforman los compuestos simples solubles ( $S_1$ ) generados en la etapa de hidrólisis y aquellos contenidos en el lodo de alimentación, que por ser rápidamente biodegradable se consideran como compuestos simples solubles, en ácidos grasos volátiles ( $S_2$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ); la velocidad con que ocurre esta reacción ( $r_1$ ) es proporcional a la velocidad de crecimiento que presentan los microorganismos acidogénicos ( $X_1$ ) la cual es dependiente de la concentración de  $S_1$ .

- Etapa de Metanogénesis: las bacterias convierten los ácidos grasos volátiles presente en la alimentación y los producidos en la etapa anterior en metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono; la velocidad con que se lleva a cabo esta reacción (r<sub>2</sub>) es proporcional a la velocidad de crecimiento que presentan los microorganismos metanogénicos (X<sub>1</sub>) la cual es dependiente de la concentración de S<sub>2</sub>.

La tasa de crecimiento para bacterias acidogénicas es modelada de acuerdo a la fórmula de Monod, mientras que la tasa de crecimiento para las bacterias metanogénicas se rige por un modelo de inhibición por sustrato, además esta cinética esta limitada por la acción de un toxico externo que actúa en forma de inhibidor no competitivo. En la figura N°3 se presenta de manera esquemática el proceso anteriormente descrito.

Figura 3: Esquema del Modelo de Digestión Anaeróbica de 3 Etapas.



Las ecuaciones que modelan el proceso de digestión anaerobia descrito son las siguientes.

$$k_7 \cdot X_0 \xrightarrow{r_0} S_1 \quad \text{ecuación (1)}$$

$$r_0 = K_1 \cdot X_0 \quad \text{ecuación (2)}$$

$$k_1 \cdot S_1 \xrightarrow{r_1} X_1 + k_2 \cdot S_2 + k_4 \cdot CO_2 \quad \text{ecuación (3)}$$

$$r_1 = \mu_1 \cdot S_1 \quad \text{ecuación (4)}$$

$$\mu_1 = \frac{\mu_{1maxima} \cdot S_1}{K_s + S_1} \quad \text{ecuación (5)}$$

$$k_3 \cdot S_2 \xrightarrow{r_2} X_2 + k_5 \cdot CO_2 + k_6 \cdot CH_4 \quad \text{ecuación (6)}$$

$$r_2 = \mu_2 \cdot S_2 \quad \text{ecuación (7)}$$

$$\mu_2 = \frac{\mu_{2maxima} \cdot S_2}{K_{s2} + S_2 + \frac{S_2^2}{K_{12}}} * \left( \frac{K_i}{K_i + \text{Toxico}} \right) \quad \text{ecuación (8)}$$

Donde:

k<sub>n</sub>= Rendimientos para la producción o consumo de la especie n ([n]/[Biomasa])

Utilizando este modelo conceptual se desarrolló un modelo basado en un sistema de ecuaciones diferenciales que gobiernan los procesos descritos y que se basa en balances de masas para las sustancias de entrada y para aquellas generadas durante el proceso. Este sistema de ecuaciones para un sistema continuo puede ser representado en forma matricial, a través de la siguiente forma:

$$\frac{d\xi}{dt} = Kr(\xi r + D(\xi(\xi - \delta \cdot \xi) - Q) \quad \text{ecuación (9)}$$

Donde:

$$\xi = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ C \\ Z \\ I \end{bmatrix} \quad k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -k_1 & 0 & k_7 \\ k_2 & -k_3 & 0 \\ k_4 & k_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad r(\xi) = \begin{bmatrix} r1 \\ r2 \\ r0 \end{bmatrix} \quad \xi_{in} = \begin{bmatrix} X_{1in} \\ X_{2in} \\ X_{0in} \\ S_{1in} \\ S_{2in} \\ C_{in} \\ Z_{in} \\ I_{in} \end{bmatrix} \quad \delta = \begin{bmatrix} d \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ qc(\xi) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- D** : Factor de dilución (Tiempo-1).  
**d** : Índice que representa la heterogeneidad de la biomasa dentro del reactor, donde d=0, equivale a un reactor con retención de células y d=1 representa un CSTR ideal.  
**qc** : Producción molar de CO<sub>2</sub>.  
**Z** : Iones.

Este conjunto de ecuaciones dan origen al modelo AM3, el cual fue implementado en MATLAB 7.5, a través del cual se utilizó el integrador "ode23s" herramienta diseñada para la resolución de ecuaciones tipo Stiff basada en la fórmula modificada de Rosenbrock de orden 2, de paso variable ([www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)).

La complejidad en la resolución de este conjunto de ecuaciones se encuentra en la determinación de las condiciones iniciales y de los parámetros cinéticos y estequiométricos que definen el proceso.

### 2.3.- Calibración.

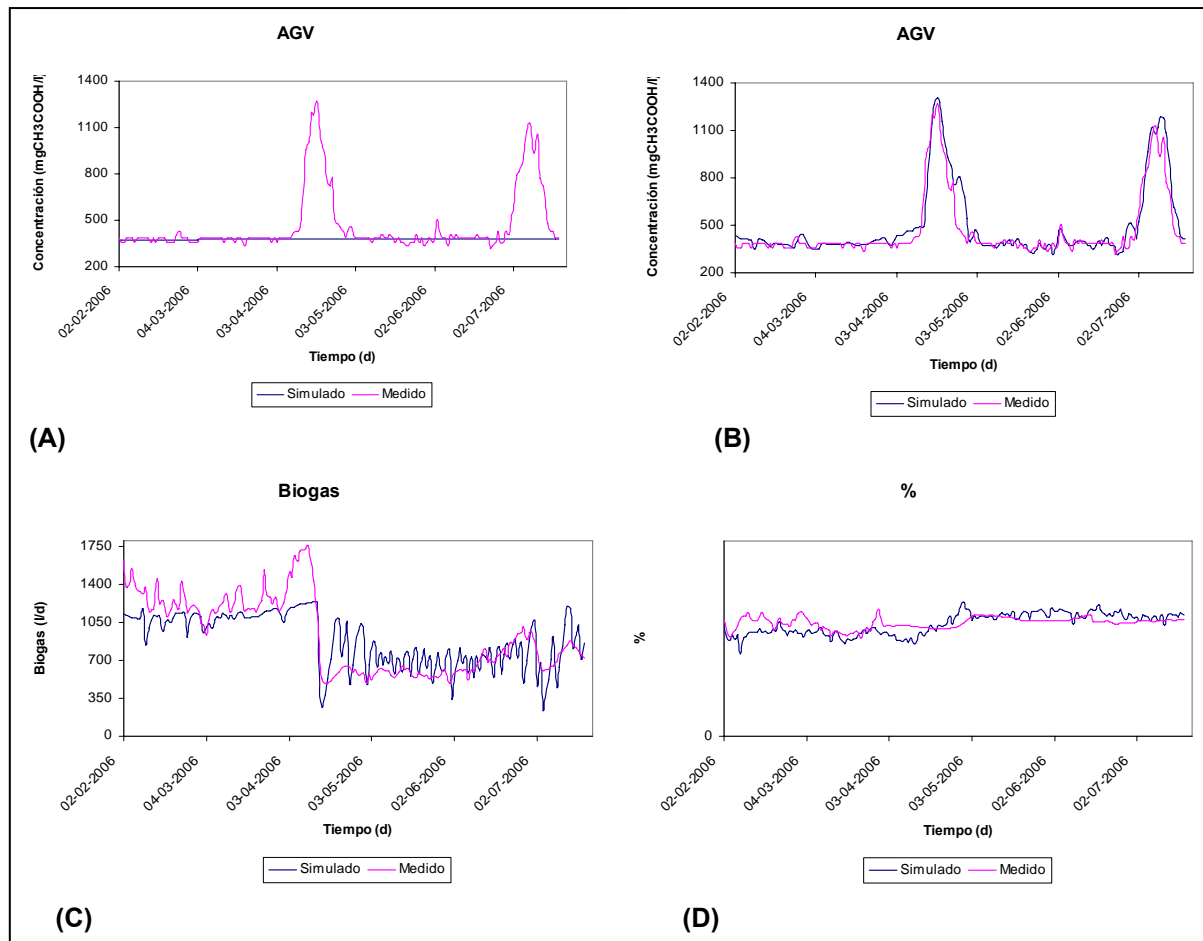
El modelo se ajustó con datos operativos correspondientes a las variables de monitoreo del proceso disponibles en la planta durante períodos de funcionamiento normal y períodos particulares. Además la calibración fue apoyada por algunas experiencias de laboratorio que permitieran la estimación de parámetros no considerados en el seguimiento operativo normal pero relevantes para la simulación del proceso.

De este modo la metodología utilizada para encontrar el conjunto de parámetros que caracteriza el proceso y los valores iniciales para algunas variables se fundamenta en minimizar el error de ajuste entre las variables medidas y las resultantes de la modelación, esta minimización se realiza utilizando inicialmente para los parámetros cinéticos y estequiométricos valores previamente recopilados de literatura, (IWA (2002), Bernard et al.(2001), Dague R.(1967), A. P. Chynoweth et al.(1994), A. J. Straub et al.(2005), María Viñas (1994), Carballo, K. et al.(1988) entre otros).

Las condiciones iniciales de simulación y el ajuste de los parámetros cinéticos y estequiométricos obtenidos de literatura a las condiciones de cada digester se obtienen utilizando el promedio de los 10 primeros valores de las series de datos operativos disponibles, el proceso consiste en simular una condición estacionaria con estos valores promedio y de este modo ajustar los parámetros y determinar las condiciones iniciales que serán utilizadas, el proceso descrito se representa para el ajuste de ácidos grasos volátiles (AGV) en la Figura 4 (A).

Una vez calibrados los parámetros y las condiciones iniciales se ejecuta el modelo con los datos reales de planta medidos a escala diaria. En esta etapa el ajuste se realiza ingresando la acción de un tóxico cuya concentración es determinada minimizando una función escalar de varias variables, empezando una estimación inicial, este método de optimización es conocido como optimización no lineal libre. Luego de haber determinado la concentración de tóxico que ingresa al sistema se obtiene la gráfica (B) correspondiente al ajuste de ácidos grasos volátiles (AGV) que se presenta en la figura 4. Además en esta figura se adjuntan los gráficos obtenidos en la modelación de biogás (C) y porcentaje de remoción (D).

Figura 4: Resultados de Calibración (Ajuste de Ácidos Grasos Volátiles , Producción de Biogás y Porcentaje de Remoción).

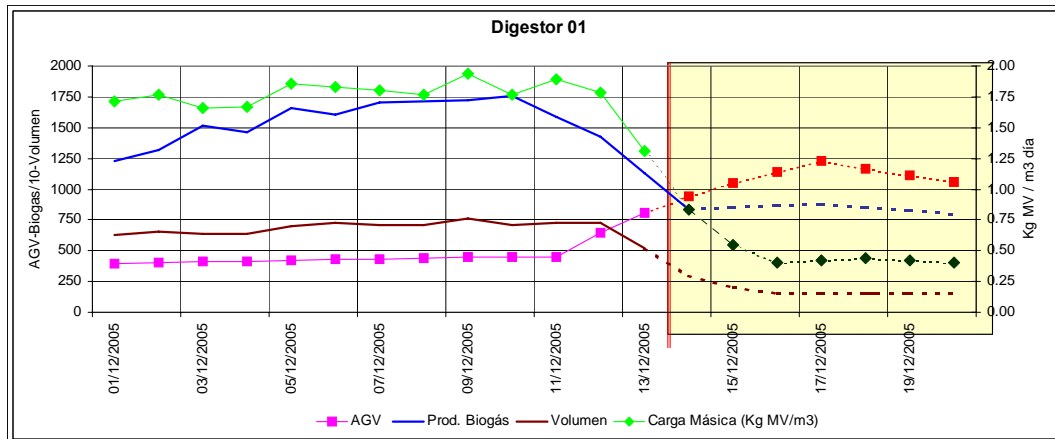


#### 2.4.- Implementación Operativa.

Como se ha mencionado, el desarrollo de un modelo numérico de digestión anaeróbica responde principalmente a la necesidad de contar con una herramienta de apoyo a la operación de este tipo de procesos dentro de una planta en funcionamiento. Dentro de este contexto su implementación debe ser tal que permita su uso para los siguientes objetivos:

- **Uso Explicativo:** orientado a buscar las variables no controladas del proceso que expliquen el comportamiento anormal de variables de control no explicadas de manera directa, lo anterior se enfoca directamente a detectar la posible influencia de un agente externo al proceso normal que pueda desestabilizarlo.
- **Uso Predictivo:** considera su utilización para pronosticar la evolución de las principales variables de control del proceso para las cargas diarias planificadas durante un período de tiempo determinado, permitiendo anticipar posibles riesgos de desestabilización. La Figura 5 grafica la evolución de las variables de control que predice el modelo para una planificación de cargas determinada de una semana, considerando un período en el cuál se observa un alza en los valores de AGV.
- **Uso Optimizador:** permite utilizar el modelo como soporte a una gestión eficiente del proceso, determinando la máxima carga a alimentar en condiciones estables y anormales de funcionamiento. La siguiente figura ilustra una propuesta optimizada de carga.

Figura 5: Resultado de los datos modelados y predicción del modelo para una alternativa de carga de alimentación.



## CONCLUSIONES.

El desarrollo e implementación del Modelo de Digestión Anaerobia AM3 ha logrado representar de manera satisfactoria y confiable el proceso de digestión que ocurre dentro de los reactores anaerobios de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas La Farfana, logrando simular el comportamiento de variables de control del proceso tales como producción de biogás, concentración de AGV y pH, entre otros.

La calibración continua mediante la incorporación de un factor inhibidor que permita ir explicando la evolución diaria de las variables de control le da una flexibilidad a la herramienta que mejora su aplicabilidad real a tareas de planificación y operación en la planta que permitan pronosticar la evolución de las principales variables de control utilizadas y optimizar la operación y las cargas de alimentación en periodos de disfunción.

Este trabajo ha permitido la aplicación de modelos conceptuales en procesos industriales mediante el desarrollo de herramientas de apoyo a la operación de procesos dentro de una planta de tratamiento en operación, dejando líneas de acción a corto y mediano plazo que permitan ir mejorando el conocimiento y aplicación de este tipo de desarrollos. De manera adicional, el estudio del proceso ha permitido mejorar significativamente el conocimiento del sistema, principalmente en las áreas operativas y de planificación del Grupo Aguas, además de los avances en investigación asociados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. IWA TASK GROUP FOR MATHEMATICAL MODELLING OF ANAEROBIC DIGESTION PROCESSES. (2000). Anaerobic Digestion Model N°1 (ADM1). IWA Publishing, Scientific and Technical Report N°13.
2. OLIVIER BERNARD, ZAKARIA HADJ-SADOK, DENIS DOCHAIN, ANTOINE GENOVESI, JEAN-PHILIPPE STEYER. (2001). Dynamical Model Development and Parameter Identification for an Anaerobic Wastewater Treatment Process. Jhon Wiley & Sons, Inc.
3. ANDREWS J. 1968. A mathematical model for the continuous culture of microorganisms utilizing substrate. Biotechnol bioeng 10:707-723.
4. GRAEF S, ANDREWS J. 1974. Mathematics modelling and control of anaerobic digestion. Water Res 8:261-289.
5. HILL D, BARTH C. 1977. A dynamic model for simulation of animal waste digestion. J Water Pollut Control Assoc 10:2129-2143.
6. DAGUE R. (1967). Solids Retention in Anaerobic Waste Treatment Systems. Doctoral dissertation. Univ. of Kansas, Lawrence.
7. A. P. CHYNOWETH, S.A. SVORONOS, G. LYBERATOS, J. L. HARMAN, P. PULLAMMANAPPALLI, J. M. OWENS AND M. J. PECK. (1994). Real-Time expert system control of anaerobic digestion. Wat. Sci. Tech Vol. 30, N°12, pp.21-29.



8. DUK CHANG, JOON HUR AND TAI HAK CHUNG.(1995). Digestion of municipal sludge by anaerobic sequencing batch reactor. Wat. Sci. Tech Vol. 30, Nº12,pp.161-170.
9. A. J. STRAUB, A. S. Q. CONKLIN, J. F. FERGUSON, H. D. STENSEL.(2005). Use of the ADM1 to investigate the effects of acetoclastic methanogen population dynamics on mesophilic digester stability. The first international workshop on the IWA anaerobic digestion model Nº1 (ADM1). Pp.51-58.
10. MARIA VIÑAS (1994). Criterio de diseño y escalado de reactores anaerobios. Tratamiento Anaerobio (III taller y seminario Latinoamericano "Tratamiento Anaerobio de aguas Residuales").pp.111-124.
11. CARBALLO, K. QUERME, PIERES, E. CLETO.(1998). Respuesta dinámica de reactores UASB sometidos a vaciado cíclico diario: modelo matemático simplificado. VII taller y simposio latinoamericano sobre digestión anaerobia. Pp.189-196.