



MODELO LOGISTICO PARA APROXIMAR CURVAS S DE PLANEACIÓN DE PROYECTOS DE ALCANTARILLADO

LOGISTICAL MODEL TO APPROXIMATE THE S CURVE OF THE PLANNING OF SEWAGE PROJECTS

Juan Carlos Osorio López¹; Juan Enrique Merizalde Aguirre²; Fernando Francisco Castro Carrera³; Edwin Patricio Castro Merino⁴

Recibido 03/06/2019; Aprobado: 28/07/2019

DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.22509.33769>

RESUMEN

Los proyectos de ingeniería tienen un plan de actividades a realizar en un tiempo inicial estimado, el cual se contrasta posteriormente con el tiempo real que efectivamente demora la ejecución del proyecto. Este plan inicial es de suma importancia tanto para el constructor como para la entidad contratante de la obra, ya que representa una relación directa de los costos de cada etapa y el tiempo que demandan. La representación gráfica de esta relación se adopta como un recurso de planificación, y su forma es similar a la curva S, sobre este gráfico se aprecia que al inicio del proyecto los costos acumulados son crecientes, y al final del se observa que decrecen. Por tales razones, en este trabajo se presenta un modelo de ecuación logística con la que se predice la planificación de un proyecto de construcción de alcantarillado partiendo de un presupuesto dado para su ejecución y el tiempo inicial estimado. El modelo se construye a partir de una muestra representativa de proyectos de alcantarillado ejecutados en la provincia de Pichincha, y se valida empleando otros no tomados en cuenta en dicha muestra. El modelo que se propone en este trabajo, tiene como valor agregado su utilidad en la toma de decisiones por parte de los entes públicos, porque proporciona una estimación más precisa sobre el cronograma valorado del proyecto.

Palabras clave: curva S; ecuación logística; planeación de proyectos de construcción; control de obras

¹Juan Carlos Osorio López: Docente Investigador de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Ecuador, Correo: JCOSORIO@puce.edu.ec, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8829-3623>

²Juan Enrique Merizalde Aguirre: Docente Investigador de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Ecuador y de la Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Ciencias Físicas y Matemática, Ecuador, Correo: JEMERIZALDE@uce.edu.ec, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8587-373>

³Fernando Francisco Castro Carrera: Docente Investigador de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Ecuador, Correo: FFCASTRO@puce.edu.ec, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6426-4828>

⁴Edwin Patricio Castro Merino: Docente Investigador de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Ecuador, EPCASTROM@puce.edu.ec, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8845-2962>

ABSTRACT

The engineering projects have a plan of activities to be carried out in an estimated initial time, which is contrasted with the real time that the execution of the project took. This initial plan is of utmost importance for both the builder and the contracting entity of the work, since this represents a direct relationship of the costs of each stage and the time they demand. The graphic representation of this relationship is adopted as a planning resource, and its form is similar to the S curve. On this graph, it can be seen that at the beginning of the project the accumulated costs are increasing, and at the end of the project it is observed that they decrease. For these reasons, this paper presents a logistic equation model that predicts the planning of a sewer construction project based on a given budget for its execution and the estimated initial time. The model is constructed from a representative sample of sewerage projects executed in the province of Pichincha, and is validated using other that not taken into account in said sample. The model proposed in this paper has as an added value its usefulness in decision-making by public entities because it provides a more accurate estimate of the project's valued timeline.

Keywords: *S curve, logistic equation, construction projects planning, control of works*

1. INTRODUCCIÓN

Los planificadores de proyectos de construcción agregan valor a la organización contratante al garantizar que la estimación y la licitación se basen en una comprensión sólida de los métodos, el tiempo y el espacio necesarios para llevar a cabo las tareas de cada contrato de construcción y los riesgos correspondientes [1]. Gráficamente la planificación de un proyecto de construcción tiene la forma de una *curva S*, ya que al principio de la ejecución el incremento de costos es bajo, posteriormente y cuando las obras se encuentran en franca ejecución el incremento es significativo, para decrecer a medida que se acerca el final del proyecto.

Mattos [2] destacó la importancia que tiene la elaboración de una *curva S* patrón o teórica a modo de estimación inicial del avance, a partir de un modelo matemático. Todo ingeniero al querer plantear tal modelo que represente un fenómeno físico, o que aproxime datos obtenidos bien sea experimentalmente o a base de planteamientos teóricos, debe tomar en cuenta cuáles son las variables que están involucradas y la relación existente entre ellas para representarlas en el modelo propuesto. Con este antecedente, en el presente artículo se plantea un modelo matemático para la programación de inversiones de proyectos de alcantarillado, a partir de datos reales de ejecución de proyectos en la provincia de Pichincha, Ecuador, basado en una solución de la ecuación logística, cuyos parámetros se obtienen optimizando el error de los mínimos cuadrados entre los puntos de la data y una curva ideal.

Cabe destacar que las soluciones de la ecuación logística poseen una forma similar a la *curva S* y para un mejor ajuste del modelo a los datos reales, a éste se le debe hacer modificaciones

menores para adaptarse a las condiciones observadas en la ejecución de proyectos. Finalmente, se validó con proyectos que no son parte de los introducidos inicialmente y se calcularon los coeficientes de correlación entre el modelo y la curva de inversiones de dichos proyectos. Para el efecto, se recopilaron datos reales de ejecución de 27 proyectos de alcantarillado en la provincia de Pichincha con cuyos montos de las planillas ejecutadas se generaron pares ordenados, en el que la abscisa representa el tiempo acumulado por mes de ejecución y, la ordenada, el valor ejecutado planillado acumulado hasta dicho mes. Estos datos permitieron desarrollar el modelo matemático para predicción de inversiones en proyectos de alcantarillado.

2. DESARROLLO

En vista de la importancia que tiene una eficiente planificación de los proyectos en obras civiles, se han realizado varios estudios y propuestas con el objetivo de racionalizar esta etapa. Entre ellas destacan Barraza, Back y Mata quienes presentan en [3] y [4] un nuevo concepto de control de proyectos llamado *curvas SS*, el cual se basa en analizar a la *curva S* cómo proceso estocástico, dejando a un lado el concepto determinista que se trabaja usualmente con dicha *curva S*. Para tal fin, consideran como variables los costos y la duración del proyecto, siendo éstos representados por distribuciones de probabilidades. Adicionalmente, presentan simulaciones interactivas de un modelo no determinístico basado en la definición de variabilidad en la duración y costo de las actividades planteadas. Finalmente, los autores consideran en sus conclusiones que éste nuevo concepto tiene la ventaja de utilizar el progreso del proyecto como un método adicional, aunque reconocen que seguirá siendo más utilizada la *curva S* determinista.

El autor Cioffi [5] hizo una aproximación de la curva utilizando la solución de una ecuación diferencial frecuentemente usada en la ecología, para esto parametrizaron tanto el tiempo como los costos e hicieron una adaptación de la solución que mejor se ajusta a los datos previamente recopilados, reportando resultados muy cercanos a los reales. Chao y Chien [6] plantearon una aproximación de la *curva S* mediante una polinomial de tercer grado y una red neuronal, cuyos parámetros fueron ajustados a un conjunto de 101 proyectos conocidos; tomaron en cuenta cuatro factores que son el monto del contrato, la duración, el tipo de trabajo y la ubicación. Entre las conclusiones que destacan, están las bondades de trabajar con una función polinomial cúbica la cual presenta un uso más conveniente en el cálculo progresivo y un buen ajuste.

Después, estos mismos autores implementaron un método de comparación de los progresos,

basado en la coincidencia de la ejecución real del proyecto versus la predicción de la *curva S* de datos, a su vez combinando una estimación preliminar del modelo de red neuronal y la estimación posterior. Entre sus conclusiones se reportaron mejoras en las aproximaciones, pero resaltan que esa metodología no reemplaza la planificación tradicional proporcionada por la *curva S* [7].

En el 2011 Cheng, Yu, & Wang se basaron en un modelo de predicción de Grey y el método de bisección para optimizar y construir uno de previsión de costos a corto plazo, el cual es empleado en cada período de la fase de construcción [8]. Posteriormente Lin, Tseng, Ho y Young [9] también modificaron el sistema de Grey que, junto a un análisis de regresión cúbica, predicen el comportamiento de series de tiempo no lineales mediante la construcción de una ecuación cuasi diferencial para ajustar la curva de pronóstico, los autores obtuvieron una mejora del 10% con respecto a los errores obtenidos con los métodos clásicos. Otros investigadores desarrollaron su propuesta basados en un sistema de Grey, concluyendo que sus resultados muestran un alto grado de eficiencia [10].

Por su parte en [11] aplicaron un esquema de regresión simple llamado modelo de tiempo y costo de Bromilow para predecir la duración de la construcción de carreteras, basado en estimaciones de costos iniciales, sin embargo, concluyen una alta inexactitud en los resultados. En el trabajo presentado en [12] se hizo un análisis de las principales causas de los retrasos en obras en países con alto riesgo geopolítico, basado en datos cuantitativos y cualitativos, obtenidos de entrevistas a 18 expertos de 16 países con altos riesgos políticos y que están a cargo de 36 proyectos.

3. METODOLOGÍA

Para el inicio de un proyecto de construcción se plantea una curva de planificación de actividades o etapas a desarrollarse durante el tiempo de ejecución de la obra, cuya gráfica es conocida como el valor planificado (PV) y a medida que se van cumpliendo tales etapas y alcanzando los tiempos, se va obteniendo la curva real del desarrollo de la obra a la que se denomina curva del valor ganado (EV), es de esperarse que esta última sea lo más parecida a la primera. Ambas curvas se asemejan a la forma de la letra *S* de allí que muchas veces son conocidas con ese nombre.

Se tomaron en cuenta para realizar este modelo la información contenidas en 113 planillas de entregas parciales de 27 proyectos de construcción de alcantarillado en la provincia de Pichincha, como estos diferían tanto en los montos en dólares asignados como también en el

tiempo que se tenía planificado su ejecución, se procedió a normalizar las variables tiempo y costo. Así, con la información obtenida en cada planilla de los lapsos cumplidos y los montos ejecutados se reflejan las curvas del valor ganado de cada proyecto llevando a la unidad tanto los tiempos de entrega de planillas y los montos acumulados. Por ejemplo, para el proyecto No 16 para el barrio San José de Cocotog parroquia Zámboza, el costo total de la obra es de \$210892,87 y se planificó ejecutar en 7 meses con supervisión mensual reportada en la Tabla 1 y visualizada la respectiva curva en la Figura 1.

Tabla 1. Normalización de los datos del proyecto No 16

| Valor ganado | | Variables normalizadas | |
|---------------|--------------------|------------------------|-----------|
| Tiempo (días) | Montos Planillados | t | x(t) |
| 0 | 0 | 0,00 | 0 |
| 30 | 10921,33 | 0,14 | 0,0517862 |
| 60 | 47355,76 | 0,29 | 0,2245489 |
| 90 | 96865,31 | 0,43 | 0,4593105 |
| 120 | 134863,86 | 0,57 | 0,6394899 |
| 150 | 167834,08 | 0,71 | 0,7958262 |
| 180 | 187429,49 | 0,86 | 0,8887427 |
| 210 | 210892,87 | 1,00 | 1,0000000 |

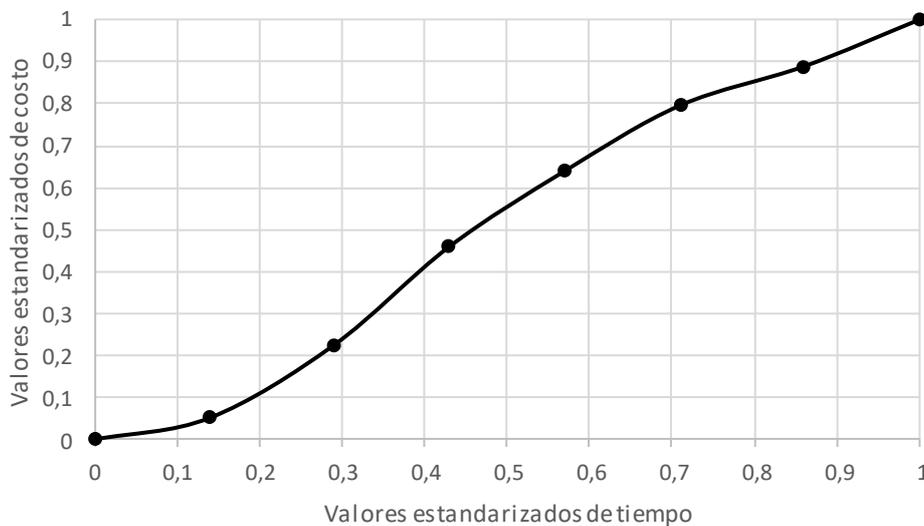


Figura 1. Curva del valor ganado del proyecto 16 con datos normalizados

Cabe destacar que el número de planillas varían de un proyecto a otro, correspondiendo generalmente una a la obra mensualmente ejecutada. El conjunto de pares ordenados $t,x(t)$ dados por todos los datos de las planillas de los proyectos involucrados, se encuentran en el rectángulo $[0,1] \times [0,1]$. Ahora bien, como era de esperarse, a las primeras planillas de cada proyecto le corresponde el par ordenado $(0,0)$ ya que en el tiempo 0 no hay monto ejecutado y sus últimas planillas son representadas por el par $(1,1)$ indicativo que para el lapso establecido



debe haberse ejecutado el total del monto asignado. Se tiene un total de 113 pares ordenados que visto como una nube de puntos se aprecia que su distribución en el plano cartesiano, tiende a ser creciente y acotado por lo que se descarta un ajuste exponencial o lineal (ver Figura 2).

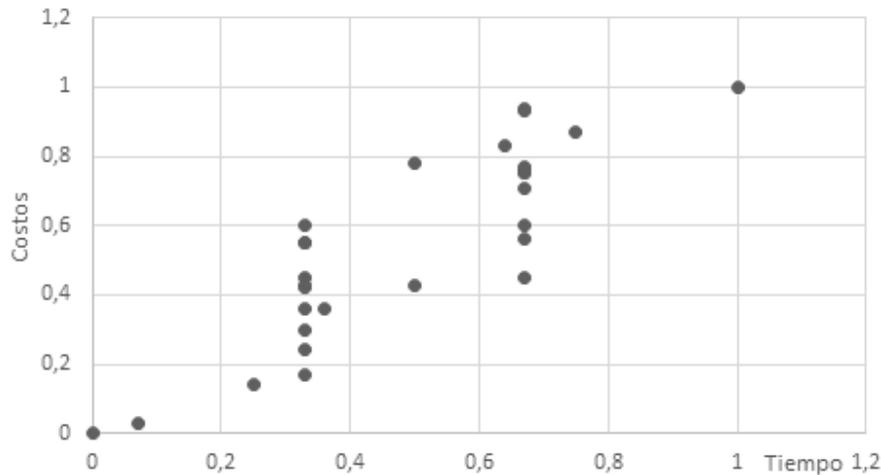


Figura 2. Matriz de puntos

Como se conoce la forma de las curvas EV y PV, se plantea hacer un ajuste logístico por mínimos cuadrados discreto, para tal fin se considera la familia de curvas dada por la expresión:

$$x(t) = \frac{KAe^{rt}}{1 + Ae^{rt}} \quad (1)$$

La cual corresponde a la solución de la ecuación diferencial logística,

$$x' = rx\left(1 - \frac{x}{K}\right) \quad (2)$$

Se observa por L'Hopital que $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = K$, ahora dado la forma de las curvas PV se espera que a medida que t tiende a 1, $x(t)$ tienda al costo total, por lo que se toma K igual a 1. Para hacer el ajuste de la nube de puntos por una curva logística, primero se hace una transformación de la curva logística en una recta mediante un cambio de variable apropiado y se minimizan los errores cuadráticos entre la recta y los puntos en cuestión. Ahora de la expresión (1) se tiene que:

$$x = \frac{Ae^{rt}}{1 + Ae^{rt}} \Rightarrow x(1 + Ae^{rt}) = Ae^{rt} \quad (3)$$

$$\Rightarrow x = Ae^{rt}(1 - x) \Rightarrow \frac{x}{1 - x} = Ae^{rt} \quad (4)$$

Así, al tomar el logaritmo natural, se logra linealizar la ecuación anterior,



$$\ln\left(\frac{x(t)}{1-x(t)}\right) = \ln(A) + rt \quad (5)$$

Esto sugiere tomar el cambio de variable $y(t) = \ln\left(\frac{x(t)}{1-x(t)}\right)$ y denotando $a = \ln(A)$ y $b = r$ con lo que se define una nueva variable como:

$$y(t) = a + bt \quad (6)$$

Con los datos normalizados obtenidos de los proyectos, salvo para (0,0) y (1,1) ya que $y(t)$ no está definida para $x=0$ y $x=1$, se calcula el nuevo conjunto de pares ordenados $(t, y(t))$ y visualizado el gráfico en la Figura 3:



Figura 3. Matriz de puntos de la nueva variable aleatoria $y(t)$

Si se denota por D a la distancia mínima de la recta a los pares ordenados, se tiene que:

$$D = \sum_{i=1}^n ((t_i - t_i)^2 + (a + t_i * b - y_i)^2) \quad (7)$$

Se observa que el primer término de la sumatoria es igual a cero y que D es una función de variables a y b , por lo que se puede derivar parcialmente respecto a sus variables e igualar a 0 para encontrar los puntos críticos de la misma.

$$\frac{\partial D}{\partial a} = \sum_{i=1}^n 2 * (a + t_i * b - y_i) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial D}{\partial b} = \sum_{i=1}^n 2 * (a + t_i * b - y_i) * t_i = 0 \quad (9)$$

Al trabajar las ecuaciones (8) y (9) se tiene el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$n * a + \left(\sum_{i=1}^n t_i \right) * b = \sum_{i=1}^n y_i \quad (10)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n t_i \right) * a + \left(\sum_{i=1}^n (t_i)^2 \right) * b = \left(\sum_{i=1}^n t_i * y_i \right) \quad (11)$$

Denotando:

$$S = \left(\sum_{i=1}^n t_i \right) \quad (12)$$

$$A = \sum_{i=1}^n y_i \quad (13)$$

$$C = \left(\sum_{i=1}^n t_i^2 \right) \quad (14)$$

$$B = \left(\sum_{i=1}^n t_i * y_i \right) \quad (15)$$

Se puede escribir matricialmente el sistema de ecuaciones como:

$$\begin{pmatrix} n & S \\ S & C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} \quad (16)$$

Por la regla de Cramer se tiene la siguiente solución única del sistema:

$$a = \frac{\begin{vmatrix} A & S \\ B & C \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & S \\ S & C \end{vmatrix}} = \frac{A * C - S * B}{n * C - S^2} \quad (17)$$

$$b = \frac{\begin{vmatrix} n & A \\ S & B \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & S \\ S & C \end{vmatrix}} = \frac{n * B - S * A}{n * C - S^2} \quad (18)$$

Obteniendo los valores de a y b se reemplaza en la ecuación (6) y finalmente se realizan las respectivas operaciones para obtener la ecuación logística (3). En la Tabla 2 se muestra la columna de los tiempos y de las variables aleatoria x(t) y y(t).



Tabla 2. Valores de las variables aleatorias $x(t)$ y $y(t)$

| Variables Aleatorias | | |
|-----------------------------|-------------|-------------|
| t | x(t) | y(t) |
| 0 | 0 | -- |
| 0,07 | 0,03 | -3,47609869 |
| 0,25 | 0,14 | -1,81528997 |
| 0,33 | 0,55 | 0,2006707 |
| 0,33 | 0,55 | 0,2006707 |
| 0,33 | 0,36 | -0,57536414 |
| 0,33 | 0,45 | -0,2006707 |
| 0,33 | 0,3 | -0,84729786 |
| 0,33 | 0,17 | -1,58562726 |
| 0,33 | 0,24 | -1,15267951 |
| 0,33 | 0,42 | -0,32277339 |
| 0,33 | 0,43 | -0,28185115 |
| 0,33 | 0,6 | 0,40546511 |
| 0,36 | 0,36 | -0,57536414 |
| 0,5 | 0,43 | -0,28185115 |
| 0,5 | 0,78 | 1,26566637 |
| 0,64 | 0,83 | 1,58562726 |
| 0,67 | 0,75 | 1,09861229 |
| 0,67 | 0,75 | 1,09861229 |
| 0,67 | 0,76 | 1,15267951 |
| 0,67 | 0,94 | 2,75153531 |
| 0,67 | 0,56 | 0,24116206 |
| 0,67 | 0,45 | -0,2006707 |
| 0,67 | 0,6 | 0,40546511 |
| 0,67 | 0,71 | 0,89538405 |
| 0,67 | 0,77 | 1,20831121 |
| 0,67 | 0,93 | 2,58668934 |
| 0,75 | 0,87 | 1,90095876 |
| 1,00 | 1,00 | -- |

Para estos valores se tiene que los coeficientes del sistema de ecuaciones indicado en (16) son (ver Tabla 3):

Tabla 3. Coeficientes del sistema de ecuaciones

| Variable | Equivalencia | Coficiente |
|-----------------|---------------------|-------------------|
| S | suma t_i | 56,09090900 |
| A | suma y_i | 43,07000000 |
| C | suma t_i^2 | 34,30213717 |
| B | suma t_i*y_i | 62,49385019 |
| n | total términos | 113,00000000 |



Utilizando las ecuaciones (17) y (18) se obtienen que $y(t) = a + b \cdot t$ donde el valor de $a = \ln(A)$ está dado por $-2,778286089$ y el valor de $b = r$ es $6,36492244$, de donde la ecuación logística inicial a considerar es:

$$x(t) = \frac{Ae^{rt}}{1 + Ae^{rt}} = \frac{e^{-2.778286089} e^{6.36492244t}}{1 + e^{-2.778286089} e^{6.36492244t}} \quad (19)$$

$$\Rightarrow x(t) = \frac{e^{6.36492244t}}{e^{2.778286089} + e^{6.36492244t}} \quad (20)$$

La función anterior fue calculada de manera óptima con respecto a los datos tomados en cuenta, pero debe cumplir otras condiciones iniciales ya que primero no pasa por los puntos (0,0) que representan el inicio de la obra, por lo que se realiza una traslación en el eje de las ordenadas restándole el valor de $x(0)$ y posteriormente, dado que tampoco pasa por el (1,1) se hace una amplitud de la misma multiplicándola por un escalar k , tal que el modelo queda de la forma siguiente:

$$\hat{x}(t) = k[x(t) - x(0)] \quad (21)$$

Donde:

$$\hat{x}(1) = k[x(1) - x(0)] = 0 \Rightarrow K = \frac{1}{x(1) - x(0)} \quad (22)$$

Con:

$$x(0) = \frac{1}{e^{2.778286089} + 1}; \quad x(1) = \frac{e^{6.36492244}}{e^{2.778286089} + e^{6.36492244}} \quad (23)$$

Así, el modelo a trabajar queda de la siguiente forma:

$$\hat{x}(t) = 1,093433 \left[\frac{e^{6.36492244t}}{e^{2.778286089} + e^{6.36492244t}} - 0,05851 \right] \quad (24)$$

En la Figura 4 se aprecia las gráficas de ambas funciones $x(t)$ y $\hat{x}(t)$:

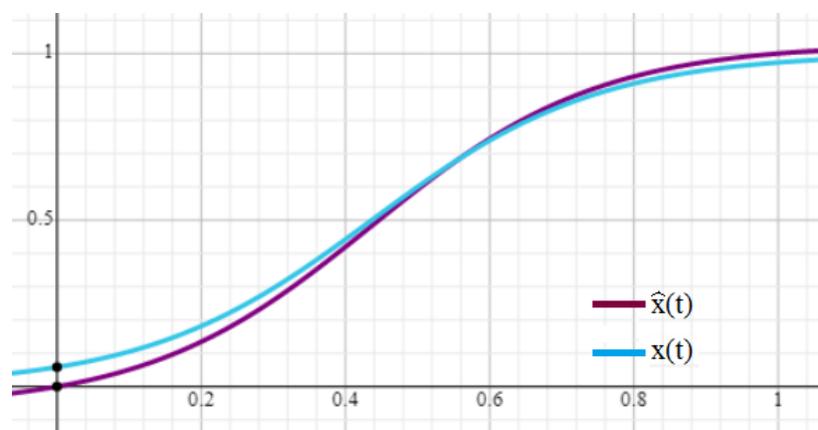


Figura 4. Gráficas de las funciones $x(t)$ y $\hat{x}(t)$

Para la aplicación del modelo matemático en un nuevo proyecto de alcantarillado con tiempo



de ejecución t_{max} y monto asignado x_{max} , del cual se desea conocer los montos acumulados para un total de N planillas a entregar, se utiliza la ecuación (24) para obtener $\hat{x}(t_k)$ para:

$$t_k = (1/N) * k ; \text{ con } k = 0,1,2,3,\dots,N \quad (25)$$

Posteriormente al multiplicar los $\hat{x}(t_k)$ por x_{max} se tiene el monto acumulado hasta la k-ésima planilla en el tiempo $t_k.t_{max}$.

4. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Por trabajar con datos discretos tanto de los proyectos como del modelo, obtenido de evaluar valores específicos de la variable tiempo en la función continua (24), se calculó el coeficiente de determinación R^2 ya que este refleja la bondad del ajuste del modelo para replicar los resultados, permitiendo conocer que tan ajustado está el modelo de los datos reales al darle un valor de 0 a 1, donde el 1 representa el mayor ajuste y 0 el menor ajuste. El coeficiente de determinación R^2 viene dado por:

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^T (\hat{Y}_t - \bar{Y})^2}{\sum_{t=1}^T (Y_t - \bar{Y})^2} \quad (26)$$

Donde:

$\hat{Y}_t =$ Valores estimados
 $\bar{Y} =$ Promedio de los valores de Y
 $\sum_{t=1}^T (Y_t - \bar{Y})^2 =$ Varianza

Al calcular el coeficiente de determinación en cada uno de los 27 proyectos se observó que, los mismo van desde 0,79 a 1 y con un coeficiente de determinación del modelo (promedio) igual a 0,92 con lo que se puede concluir que el modelo realmente se ajusta bien a los datos (Ver Tabla 4).

Tabla 4. *Proyectos de alcantarillado analizados*

| Nombre del proyecto | Duración (meses) | Contratado (x) (\$) | Modelo ($\hat{x}(t)$) (\$) | R^2 |
|---|------------------|---------------------|------------------------------|-------|
| 01_Alcantarillado barrio 11 de mayo, Santa Catalina, barrio Espejo Chillogallo | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,95 |
| | 1 | 43489,64 | 15123,19 | |
| | 2 | 89830,41 | 46672,62 | |
| | 3 | 118462,81 | 95355,92 | |
| | 4 | 136282,08 | 144039,22 | |
| | 5 | 180583,23 | 175588,64 | |
| 02_Diseño definitivo para la ampliación y optimización del sistema de alcantarillado de la cabecera parroquial de Mindo, cantón San Miguel de los Bancos, provincia | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,90 |
| | 1 | 14699,19 | 30923,27 | |
| | 2 | 28650,17 | 84107,13 | |
| | 3 | 54490,17 | 167179,62 | |



MODELO LOGISTICO PARA APROXIMAR CURVAS S DE PLANEACIÓN DE PROYECTOS DE ALCANTARILLADO

| | | | | |
|--|---|-----------|-----------|------|
| Pichincha | 4 | 54490,17 | 279245,02 | |
| | 5 | 175669,19 | 403877,85 | |
| | 6 | 376770,74 | 515943,25 | |
| | 7 | 501281,10 | 599015,74 | |
| | 8 | 575502,71 | 652199,60 | |
| | 9 | 683122,87 | 683122,87 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| | 1 | 79930,26 | 24662,95 | |
| | 2 | 142415,25 | 72459,19 | |
| 03_Construcción del sistema de alcantarillado sanitario para la comunidad de Picalqui, Tabacundo | 3 | 220300,29 | 148660,23 | 0,95 |
| | 4 | 264933,92 | 239072,92 | |
| | 5 | 303749,09 | 315273,96 | |
| | 6 | 335557,79 | 363070,20 | |
| | 7 | 387733,15 | 387733,15 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| 04_Alcantarillado para San Blas y Achomeg, pasaje C y varios sectores, parroquia Turubamba | 1 | 56047,48 | 21671,73 | |
| | 2 | 105645,61 | 72652,52 | 0,93 |
| | 3 | 142129,07 | 123633,32 | |
| | 4 | 145305,05 | 145305,05 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| | 1 | 53165,33 | 12229,68 | |
| | 2 | 90713,38 | 37742,75 | |
| 05_Alcantarillado barrio Yanahuayco | 3 | 94521,60 | 77111,48 | 0,83 |
| | 4 | 107481,01 | 116480,21 | |
| | 5 | 123410,77 | 141993,29 | |
| | 6 | 154222,96 | 154222,96 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| | 1 | 29687,29 | 11411,34 | |
| 06_Alcantarillado pluvial, aceras y adoquinado Calle 1 y Coronel Donoso | 2 | 44864,76 | 37091,20 | 0,93 |
| | 3 | 53110,53 | 72296,49 | |
| | 4 | 100844,72 | 97976,35 | |
| | 5 | 109387,69 | 109387,69 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| | 1 | 21766,97 | 31170,16 | |
| 07_Alcantarillado combinado para los barrios altos de la Argelia primera etapa | 2 | 74626,43 | 101314,87 | 0,81 |
| | 3 | 106028,09 | 197478,40 | |
| | 4 | 138881,34 | 267623,12 | |
| | 5 | 298793,28 | 298793,28 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| | 1 | 13243,49 | 10859,39 | |
| 08_Santa Ana, barrio, La Merced, alcantarillado | 2 | 38359,32 | 30590,65 | 0,98 |
| | 3 | 68599,14 | 61950,86 | |
| | 4 | 111128,35 | 102552,40 | |
| | 5 | 139014,05 | 143153,94 | |
| | 6 | 147828,88 | 174514,15 | |

| | | | | |
|---|----|-----------|-----------|------|
| | 7 | 172537,78 | 194245,42 | |
| | 8 | 205104,81 | 205104,81 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| 09_Extensión de redes de alcantarillado para varios sectores de la parroquia San Isidro de El Inca | 1 | 34097,40 | 12923,34 | |
| | 2 | 61694,68 | 43324,33 | 0,93 |
| | 3 | 77832,62 | 73725,33 | |
| | 4 | 86648,67 | 86648,67 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| 10_La Macarena 2da etapa, parroquia Conocoto, alcantarillado | 1 | 36053,04 | 16066,22 | |
| | 2 | 66332,09 | 49582,95 | |
| | 3 | 88926,58 | 101301,97 | 0,93 |
| | 4 | 112405,51 | 153020,99 | |
| | 5 | 149135,68 | 186537,73 | |
| | 6 | 202603,95 | 202603,95 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| 11_Interceptor quebrada Calicanto | 1 | 49739,17 | 10365,10 | |
| | 2 | 74456,41 | 27379,40 | |
| | 3 | 94426,04 | 53366,69 | |
| | 4 | 108447,90 | 88993,46 | |
| | 5 | 140145,87 | 131227,76 | 0,97 |
| | 6 | 163948,28 | 173462,06 | |
| | 7 | 205656,48 | 209088,83 | |
| | 8 | 233532,56 | 235076,12 | |
| | 9 | 252865,07 | 252090,42 | |
| | 10 | 262455,52 | 262455,52 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| 12_Construcción del proyecto: alcantarillado línea férrea, descargas barrios Santa Inés y San José. Parroquia Cumbayá | 1 | 42534,28 | 17018,04 | |
| | 2 | 92636,90 | 55315,12 | 0,93 |
| | 3 | 128562,52 | 107817,74 | |
| | 4 | 138620,27 | 146114,82 | |
| | 5 | 163132,86 | 163132,86 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| 13_Extensiones de redes alcantarillado para varios sectores zona Quitumbe grupo1 | 1 | 107141,39 | 25998,97 | |
| | 2 | 183945,12 | 84506,56 | 0,82 |
| | 3 | 229223,58 | 164716,38 | |
| | 4 | 235784,81 | 223223,97 | |
| | 5 | 249222,94 | 249222,94 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| 14_Alcantarillado vía e35, barrio san Carlos, parroquia Yaruquí | 1 | 84625,01 | 25247,97 | |
| | 2 | 159487,48 | 82065,52 | 0,88 |
| | 3 | 234680,15 | 159958,43 | |
| | 4 | 239734,29 | 216775,99 | |
| | 5 | 242023,96 | 242023,96 | |
| 15_Extensiones de redes alcantarillado | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,93 |

MODELO LOGISTICO PARA APROXIMAR CURVAS S DE PLANEACIÓN DE PROYECTOS DE ALCANTARILLADO

Artículo de Investigación

46

| | | | | |
|--|----|-----------|-----------|------|
| para varios sectores zona Quitumbe grupo1 | 1 | 60664,29 | 16114,69 | |
| | 2 | 133865,88 | 41535,41 | |
| | 3 | 212715,11 | 79464,33 | |
| | 4 | 264515,75 | 131601,49 | |
| | 5 | 309761,47 | 195736,89 | |
| | 6 | 347539,85 | 264672,33 | |
| | 7 | 374226,19 | 328807,73 | |
| | 8 | 427689,73 | 380944,89 | |
| | 9 | 453831,71 | 418873,81 | |
| | 10 | 461664,95 | 444294,53 | |
| | 11 | 460409,22 | 460409,22 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| 16_Alcantarillado para el barrio San José de Cocotog. Parroquia Zámbriza | 1 | 10921,33 | 13414,48 | |
| | 2 | 47355,76 | 39411,45 | |
| | 3 | 96865,31 | 80858,14 | 0,99 |
| | 4 | 134863,86 | 130034,73 | |
| | 5 | 167834,08 | 171481,42 | |
| | 6 | 187429,49 | 197478,39 | |
| | 7 | 210892,87 | 210892,87 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| 17_Alcantarillado barrio Pinguilla, parroquia Puéllaro | 1 | 94027,34 | 24556,70 | |
| | 2 | 170238,72 | 75785,93 | |
| | 3 | 216999,33 | 154836,76 | 0,91 |
| | 4 | 255665,80 | 233887,60 | |
| | 5 | 284175,14 | 285116,83 | |
| | 6 | 309673,53 | 309673,53 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| 18_Alcantarillado para los barrios Campiña del Pichincha, Anita Lucía del Norte, Pueblo Nuevo, 15 de julio y Mirador de Cotocollao, parroquia El Condado | 1 | 1122,27 | 14310,08 | |
| | 2 | 30083,61 | 36884,04 | |
| | 3 | 52276,88 | 70565,47 | |
| | 4 | 100402,73 | 116864,02 | |
| | 5 | 147809,71 | 173817,18 | 1 |
| | 6 | 207320,64 | 235032,85 | |
| | 7 | 277593,95 | 291986,02 | |
| | 8 | 346029,73 | 338284,57 | |
| | 9 | 369812,50 | 371966,00 | |
| | 10 | 400531,05 | 394539,96 | |
| | 11 | 408850,04 | 408850,04 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| 19_Miraflores, Comuna, parroquia Ñaquito. Alcantarillado | 1 | 53767,48 | 14110,74 | |
| | 2 | 93091,96 | 43548,02 | |
| | 3 | 138402,85 | 88972,11 | 0,91 |
| | 4 | 161296,37 | 134396,20 | |
| | 5 | 176534,18 | 163833,48 | |
| | 6 | 177944,22 | 177944,22 | |



| | | | | |
|--|---|-----------|-----------|------|
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| | 1 | 47723,64 | 27821,38 | |
| 20_Extensión redes alcantarillado para varios tramos de los sectores El Guabo, Pasada Matilde Huertas, Monjas | 2 | 131785,43 | 85861,27 | 0,98 |
| | 3 | 213625,75 | 175421,50 | |
| | 4 | 288986,69 | 264981,74 | |
| | 5 | 324574,13 | 323021,63 | |
| | 6 | 350843,01 | 350843,01 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| | 1 | 8910,48 | 9917,84 | |
| 21_Extension alcantarillado para parroquia Guangopolo | 2 | 29454,89 | 29138,39 | 0,98 |
| | 3 | 48786,44 | 59781,51 | |
| | 4 | 70776,78 | 96139,63 | |
| | 5 | 117737,77 | 126782,75 | |
| | 6 | 135734,06 | 146003,30 | |
| | 7 | 155921,14 | 155921,14 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| 22_Extensión redes alcantarillado para calle Ignacio Gallardo y pasaje Sisaloma, parroquia Puenbo | 1 | 82556,98 | 29338,18 | 0,89 |
| | 2 | 146782,26 | 98353,59 | |
| | 3 | 166859,13 | 167369,00 | |
| | 4 | 196707,18 | 196707,18 | |
| | 0 | - | - | |
| 23_Prolongacion descarga sistema barrio Rancho Los Pinos | 1 | 14841,81 | 14263,80 | 1,00 |
| | 2 | 44725,12 | 44020,40 | |
| | 3 | 58284,20 | 58284,20 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| 24_Alcantarillado para barrios El Tejar, La Joya y vía e35, parroquia Yaruquí | 1 | 54417,09 | 27501,22 | 0,96 |
| | 2 | 126696,11 | 92195,36 | |
| | 3 | 165300,34 | 156889,50 | |
| | 4 | 184390,72 | 184390,72 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| 25_construccion del sistema de alcantarillado pluvial del barrio Johanna de reyes del plan de vivienda municipal de Santo Domingo de los Tsachilas | 1 | 77689,80 | 32364,44 | 0,87 |
| | 2 | 124390,88 | 99881,90 | |
| | 3 | 132246,34 | 132246,34 | |
| | 0 | 0,00 | 0,00 | |
| 26_construccion del alcantarillado pluvial, alcantarillado sanitario y tratamiento primario de la calle Jorge vera y Benjamín Carrion del barrio san francisco de la coop De vivienda santa Martha sector 4 del cantón Santo Domingo, provincia Santo Domingo de los Tsachilas | 1 | 85566,89 | 31081,14 | 0,79 |
| | 2 | 98816,88 | 95921,42 | |
| | 3 | 127002,56 | 127002,56 | |
| | | | | |
| | 0 | - | - | |
| 27_Extensión alcantarillado para parroquia Guangopolo | 1 | 13709,55 | 12098,42 | 0,94 |
| | 2 | 87496,31 | 31957,96 | |
| | 3 | 133392,91 | 62291,03 | |
| | 4 | 150209,22 | 103875,55 | |
| | 5 | 171888,16 | 153172,55 | |

| | | |
|----|-----------|-----------|
| 6 | 193514,89 | 202469,55 |
| 7 | 225027,72 | 244054,07 |
| 8 | 254076,81 | 274387,14 |
| 9 | 283876,49 | 294246,68 |
| 10 | 306345,10 | 306345,10 |

Para validar el modelo se consideró la planificación inicial (PV) y los datos de las planillas de ejecución (EV) del proyecto de alcantarillado “Extensión de Redes de Alcantarillado para varios sectores de la Parroquia Calderón”, luego se contrastan con los montos mediante el modelo. El proyecto se planea ejecutar en un tiempo de 10 meses y por un monto de USD 618769,33 y se desea obtener el costo acumulado a ejecutar mensualmente, se buscan las imágenes de cada t_k con $k=1 \dots 10$. (Ver tabla 5).

Tabla 5. Proyecto de alcantarillado de Calderón

| Mes t_k | P.V. (\$) | E.V. (\$) | Modelo (\$) | R^2 |
|-----------|-----------|-----------|-------------|--------------------------------|
| 1 | 33263,30 | 42345,72 | 31471,48 | Entre el Modelo y El EV 0,9715 |
| 2 | 125713,09 | 134385,59 | 83144,12 | |
| 3 | 225482,52 | 225515,11 | 160006,66 | |
| 4 | 253798,93 | 254141,32 | 259050,60 | |
| 5 | 328808,93 | 329286,65 | 365503,22 | |
| 6 | 375280,93 | 384638,99 | 459766,72 | |
| 7 | 496304,56 | 496304,55 | 529950,66 | |
| 8 | 528315,65 | 535642,46 | 575750,76 | |
| 9 | 564497,12 | 600937,67 | 603121,17 | |
| 10 | 618769,33 | 618604,64 | 618625,67 | |

Al calcular los coeficientes de determinación entre el modelo y los valores de EV se obtiene el valor de 0,9715 el cual es menor al coeficiente de determinación entre el PV planteado por el constructor y los valores del EV. (Ver figura 5).

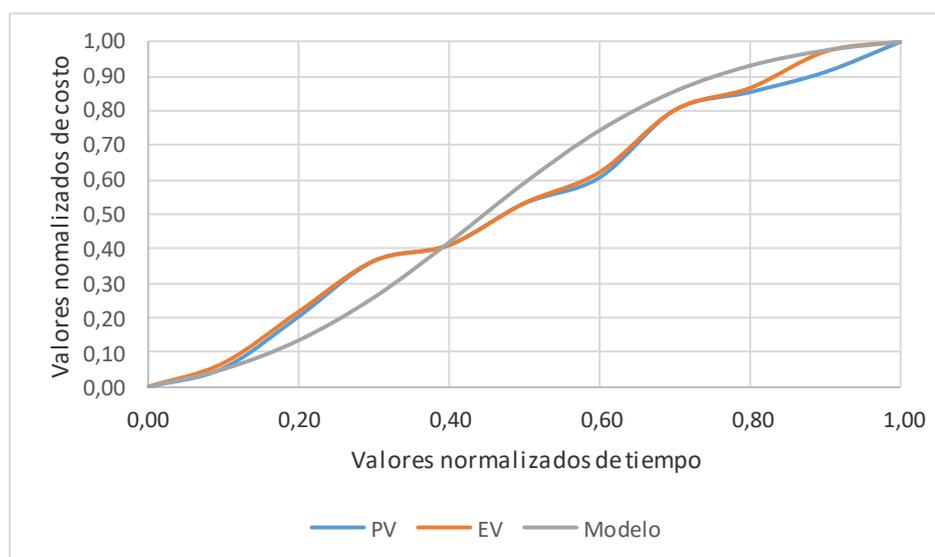


Figura 5. Gráficas de las curvas PV, EV y del modelo para el proyecto de Calderón



5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo matemático basado en una solución de la ecuación logística, a partir de la información recopilada de 27 proyectos de alcantarillado ejecutados en la provincia de Pichincha. El ajuste del mismo fue estimado mediante el cálculo de los coeficientes de determinación de los proyectos tomados en cuenta para su desarrollo, dando en promedio un coeficiente de determinación de 0,92 y su correlación con el modelo obtenido de 0,96, logrando estandarizar un comportamiento idealizado en la construcción de proyectos de alcantarillado en la provincia de Pichincha.

Se validó el modelo propuesto con otro proyecto de alcantarillado, distinto a los iniciales que fueron tomados en cuenta para ajustar la curva del modelo, obteniendo un mejor resultado que el planteado por el constructor en su curva de planificación inicial. El modelo propuesto puede ser de utilidad tanto para constructores, entes públicos promotores de proyectos y entidades financieras, ya que con esta herramienta se tendrá mayor probabilidad de que la programación de la construcción de un proyecto de alcantarillado responda de mejor manera a los avances reales, permitiendo ubicar oportunamente los recursos materiales, humanos y financieros para una ejecución optimizada de este tipo de proyectos.

La investigación se enfocó en proyectos geográficamente localizados en la provincia de Pichincha, por lo que convendría continuar las investigaciones en proyectos de la misma tipología, de diferentes magnitudes y en otras regiones geográficas. Con los resultados obtenidos en esta investigación se da lugar a proponer en el futuro modelaciones con otros métodos de programación de obras como puede ser el método de línea de balance (LOB).

6. RECONOCIMIENTOS

Un agradecimiento especial a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador que a través de la Dirección de Investigación financió este proyecto. También queremos hacer un reconocimiento a los estudiantes y ahora ingenieros civiles que participaron en el proyecto: Katherine Vizúete, Karina Granja y Steven Rueda.

7. REFERENCIAS

- [1] G. M. Winch and J. Kelsey, «What do construction project planners do?» *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 23, no. 2, pp. 141–149, 2005
- [2] A. Mattos and F. Valderrama, «Métodos de planificación y control de obras: Del diagrama de barras al BIM» Barcelona, 2014
- [3] G. A. Barraza, W. E. Back, and F. Mata, «Probabilistic monitoring of project performance using SS-curves» *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 126, no. April, p. 32887, 2002
- [4] G. A. Barraza, W. E. Back, and F. Mata, «Probabilistic Forecasting of Project Performance Using Stochastic S Curves» *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 130, no. 1, pp.

- 25–32, 2004
- [5] D. F. Cioffi, «A tool for managing projects: An analytic parameterization of the S-curve» *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 23, no. 3, pp. 215–222, 2005
- [6] L. Chao and C. Chien, «Estimating Project S-Curves Using Polynomial Function and Neural Networks» *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 135, no. 3, pp. 169–177, 2009
- [7] L. C. Chao and C. F. Chien, «A Model for Updating Project S-curve by Using Neural Networks and Matching Progress» *Autom. Constr.*, vol. 19, no. 1, pp. 84–91, 2010
- [8] Y.-M. Cheng, C.-H. Yu, and H.-T. Wang, «Short-Interval Dynamic Forecasting for Actual S -Curve in the Construction Phase» *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 137, no. 11, pp. 933–941, 2011
- [9] M. Chiao Lin, H. Ping Tserng, S. Ping Ho, and D. L. Young, «A novel dynamic progress forecasting approach for construction projects» *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 3, pp. 2247–2255, 2012
- [10] J. R. S. Cristóbal et al., «A Residual Grey Prediction Model for Predicting S-curves in Projects» *Procedia Comput. Sci.*, vol. 64, pp. 586–593, 2015
- [11] A. Czarnigowska and A. Sobotka, «Time-cost relationship for predicting construction duration» *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 518–526, 2013
- [12] M. Kadry, H. Osman, and M. Georgy, «Causes of Construction Delays in Countries with High Geopolitical Risks» *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 143, no. 2, p. 04016095, 2017