

01-003

STABILITY STUDY OF COST PREDICTION METHODS WITH EARNED VALUE ANALYSIS

Barrientos-Orellana, Alexis (1); Ballesteros-Pérez, Pablo (2); Mora-Melià, Daniel (1);
Cerezo-Narváez, Alberto (3)

(1) Universidad de Talca, (2) Universitat Politècnica de València, (3) Universidad de Cádiz

Earned Value Management (EVM) is a technique for monitoring, controlling and forecasting the cost and duration of any project. Most research in EVM has focused on anticipating the project final duration and cost. However, few studies have compared the stability of deterministic cost forecasting methods (EAC). Moreover, previous studies have mostly focused on the stability of the cost performance index or CPI. Consequently, the objective of this study is to compare the stability of 15 deterministic cost forecasting methods in EVM. Specifically, we simulate the execution of 4100 artificial projects of different topological structures. Pearson's, Spearman's and Kendall's correlation coefficients are used to measure the stability of EAC methods. The stability of the methods is measured at 10% intervals of project progress. The EAC methods achieve stability from 70% – 80% of project execution onwards. Among the compared methods, the $EAC=AC+(BAC-EV)$ and the $EAC=AC+(BAC-EV)/CPI$ methods stand out as the more stable. Results of this study will enable project management professionals to take timely corrective measures even at early project execution stages.

Keywords: earned value management; cost; stability metrics; project topology; simulation

ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE LOS MÉTODOS DE PREDICCIÓN DEL COSTO CON ANÁLISIS DEL VALOR GANADO

El Análisis del Valor Ganado o EVM es una técnica que permite controlar y predecir el costo y duración de cualquier tipo de proyecto. Una gran mayoría de la investigación en EVM se ha centrado en predecir la duración y el costo final del proyecto. Sin embargo, pocos estudios han comparado la estabilidad de los métodos deterministas de predicción del costo (EAC). Además, los estudios realizados han medido principalmente la estabilidad del índice de rendimiento de los costos o CPI. El objetivo de este estudio es comparar la estabilidad de 15 métodos deterministas de predicción del costo en EVM. Concretamente, se simula la ejecución de 4100 proyectos artificiales de diferentes estructuras topológicas. Para medir la estabilidad de los métodos EAC se utilizan los coeficientes de correlación de Pearson, Spearman y Kendall. La estabilidad de los métodos se mide a intervalos de 10% de progreso del proyecto. Los métodos EAC logran estabilizarse a partir del 70% – 80% de la ejecución de los proyectos. Entre los métodos comparados, el $EAC=AC+(BAC-EV)$ y $EAC=AC+(BAC-EV)/CPI$ destacan como los más estables. Los resultados de este estudio permitirán a los profesionales de dirección de proyectos adoptar medidas correctivas más efectivas incluso desde etapas tempranas del proyecto.

Palabras clave: análisis de valor ganado; costo; métricas de estabilidad; topología de proyectos; simulación.

Correspondencia: Alexis Barrientos Orellana. Correo: alexis.barrientos@utalca.cl

Agradecimientos: El primer autor agradece a la Universidad de Talca por su Beca del Programa de Doctorado (RU-056-2019).



©2022 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

Un proyecto de construcción se suele considerar exitoso si se completa conforme a los tiempos y costos planeados (Anysz y Buczkowski, 2019). Por el contrario, los efectos de las demoras y sobrecostos en la ejecución de proyecto de construcción son siempre negativos para casi todas las partes involucradas (Anysz, 2019). En este sentido, estudios recientes han determinado que las causas más recurrentes en los proyectos retrasados y con sobrecosto son unas nulas o deficientes prácticas de planificación y control (Ballesteros-Pérez et al., 2020). Como resultado, parece imprescindible implementar técnicas que permitan medir con precisión si un proyecto está adelantado o retrasado durante la propia ejecución (Barrientos-Orellana et al., 2022). También es conveniente que estas técnicas permitan conocer si el proyecto terminará en plazo y con qué costo.

Pronosticar la duración y el costo real de un proyecto en curso es un aspecto esencial de la gestión de proyectos. Una de las técnicas que permite medir el desempeño actual y realizar proyecciones en términos de plazo y costo es el Análisis de Valor Ganado o EVM (*Earned Value Management*) (Batselier y Vanhoucke, 2017). Debido a su simplicidad, escasa necesidad de información y rapidez de cálculo, EVM es una de las técnicas de control más utilizadas por los profesionales en el campo de la gestión de proyectos (Khamooshi y Golafshani, 2014).

EVM se basa en tres métricas clave para medir y evaluar el estado de un proyecto (Anbari, 2003): costo real (AC), valor planeado o planificado (PV) y valor ganado (EV). La comparativa de estas métricas proporcionan señales de alerta temprana que también permiten pronosticar el costo y duración finales del proyecto (Wauters y Vanhoucke, 2015). AC representa el costo acumulado real del trabajo realizado hasta el momento de control o tiempo actual (AT). PV representa el costo planificado acumulado a medida que avanza el proyecto. EV es el costo acumulado planificado del proyecto por el trabajo completado hasta el periodo de control actual (Anbari, 2003). PV y EV tienen bastantes similitudes. Ambos representan el costo acumulado del mismo presupuesto planificado, pero su ritmo de ejecución marca la diferencia: según lo planificado para PV y según lo ejecutado para EV (Ballesteros-Pérez et al., 2019).

Adicionalmente, EVM permite visualizar diferentes escenarios en un proyecto mediante el Índice de Desempeño de los Costos (CPI) y el Índice de Desempeño de la Duración (SPI). Las fórmulas de ambos son $CPI=EV/AC$ y $SPI=EV/PV$. Si SPI o CPI resultan igual a 1.0, el rendimiento es eficiente y según lo planificado. Si SPI o CPI son mayores a 1.0, el rendimiento es más eficiente de lo planeado. En caso contrario, si SPI o CPI son menores a 1.0, esto apunta a que el proyecto está retrasándose o costando más de lo previsto.

En los últimos años se han propuesto diversas extensiones y reformulaciones de la técnica EVM. Sin embargo, las ventajas que sus autores les atribuyen siguen siendo inciertas. En particular, existen pocos estudios transversales que comparen y homogeneicen la estabilidad de los métodos de predicción del costo o EAC (*Estimated cost At Completion*). Tampoco se ha analizado si una posible combinación o reformulación metodológica de las mismas extensiones podría potenciar sus ventajas (de Andrade, Martens y Vanhoucke, 2019).

2. Objetivo

Este estudio comparará la estabilidad de 15 métodos deterministas de pronóstico del costo, comúnmente denominados EAC en la metodología EVM. Específicamente, el término 'estabilidad' se define como la capacidad de un método EAC de experimentar una baja volatilidad a medida que el proyecto avanza y se recibe nueva información. Esta baja volatilidad (alta estabilidad) debe manifestarse por medio de una alta correspondencia y baja oscilación entre el valor pronosticado del costo actual del proyecto y su costo real (final).

3. Revisión de literatura

Tras una revisión bibliográfica, los métodos EAC utilizados con mayor frecuencia para predecir el costo de un proyecto en EVM durante los últimos 30 años son los indicados en la Tabla 1. La primera columna asigna una identificación numérica (ID) a los métodos. La segunda columna identifica al método por cada métrica. La tercera columna identifica la métrica estudiada en cada método. En la cuarta columna se muestran las expresiones matemáticas del método EAC. En la última columna se indica a los autores de cada método EAC.

Tabla 1. Métodos de pronóstico del costo EAC del proyecto

ID	Método	EAC	Expresión	Autores
1	EVM	V1	$EAC_{V1} = AC + (BAC-EV)$	
2	EVM	V2	$EAC_{V2} = AC + (BAC-EV)/CPI$	
3	EVM	V3	$EAC_{V3} = AC + (BAC-EV)/SPI$	(Christensen, 1999)
4	EVM	V4	$EAC_{V4} = AC + (BAC-EV)/SCI$	
5	EVM	V5	$EAC_{V5} = AC + (BAC-EV)/(\alpha CPI + \beta SPI)$	
6	EVM	ES1	$EAC_{ES1} = AC + (BAC-EV)/SPI(t)$	
7	EVM	ES2	$EAC_{ES2} = AC + (BAC-EV)/SCI(t)$	(Lipke, 2003)
8	EVM	ES3	$EAC_{ES3} = AC + (BAC-EV)/(\alpha CPI + \beta SPI(t))$	
9	EVM	SP1	$EAC_{SP1} = BAC/SCI$	(Anbari, 2003)
10	ESM	ESM1	$EAC_{ESM1} = AC + (BAC-EV(e))/SPI(t)(e)$	
11	ESM	ESM2	$EAC_{ESM2} = AC + (BAC-EV(e))/CPI(t)(e)$	(Lipke, 2012)
12	ESM	XSM1	$EAC_{ESM3} = AC + (BAC-EV(e))/SCI(t)(e)$	
13	XSM	XSM3	$EAC_{XSM3} = AC + (BAC-EV)/T_{t, EDI}$	(Khamooshi y Abdi, 2017)
14	XSM	XSM1	$EAC_{XSM1} = AC + (BAC-EV)/T_{t, SPI(t)}$	
15	XSM	XSM1	$EAC_{XSM2} = AC + (BAC-EV)/(T_{t, EV}/T_{t, AC})$	(Batselier y Vanhoucke, 2017)

Los métodos 1 a 5 determinan la Estimación del Costo en función del Factor de Rendimiento del trabajo futuro (PF). El método 1 estima que $PF=1$. Esto implica que el trabajo futuro seguirá el programa base del proyecto. Los métodos 2 a 4 asignan a PF un valor en función de los rendimientos de los plazos y costos actuales. Mientras, en el método 5 el valor de PF es $\alpha CPI + \beta SPI$. Esto significa que el rendimiento del costo adopta un rendimiento ponderado del tiempo y costo actuales. Los valores asignados a α y β en este estudio comparativo son los propuestos por sus autores (0.8 y 0.2, respectivamente).

Los métodos 6 a 8 asignan a PF un valor en función de la Programación Ganada (ES). ES identifica en qué incremento de tiempo t del Valor Planeado (PV) debería haberse logrado el valor ganado (EV) presente. En el método 6, $PF=SPI(t)$, lo que supone que el desempeño del costo seguirá el rendimiento de la duración Ganada (ES) actual. En el método 7, el valor de $PF=SCI(t)$, es decir, se espera que el costo del proyecto siga el rendimiento del tiempo y costo actuales. Mientras, en el método 8, el valor de $PF=\alpha CPI + \beta SPI(t)$. Esto indica que el rendimiento del costo seguirá otra suma ponderada en función del tiempo y costo actuales.

El método 9 divide el Presupuesto total Planificado del proyecto (BAC) entre el Índice de Desempeño Crítico (SCI). SCI considera el cumplimiento del costo y programa del proyecto hasta el Periodo Actual (AT) y se calcula como SPI multiplicado por CPI.

Los métodos 10 a 12 son similares a los métodos 3, 2 y 4 respectivamente. Sin embargo, sustituyen la Programación Ganada (ES) por la Programación Ganada Efectiva (ES(e)). ES(e) incorpora el denominado factor P, el cual representa la proporción de EV acumulado que coincide exactamente con el valor planificado hasta la duración actual.

Los métodos 13 a 15 integran la Programación Ganada (ES) con el método EDM (*Earned Duration Management*) para pronosticar el costo de un proyecto, pero aplicando las técnicas de Suavizado Exponencial Simple (SES), y Suavizado Exponencial Lineal (LES). Estos métodos recurren a diferentes factores de suavización que determinan la capacidad de respuesta con la que las estimaciones de costo del proyecto responden a las variaciones de estimaciones anteriores.

Por otro lado, y a modo de resumen, los estudios que han comparado la estabilidad de los métodos EAC se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de investigaciones sobre estabilidad de los métodos EAC

Estudio Referencia	Nº proyectos		Métodos EAC	
	Artificiales	Reales	Analizados	Destacados
Payne (1990)	-	26	2	-
Christensen y Heise (1992)	-	400	2	-
Christensen y Templin (2002)	-	240	2	-
Henderson y Zwikael (2008)	-	45	2 y 6	2
Wauters y Vanhoucke (2015)	90	2	1 y 8	1 y 2
Petter, Ritschel y White (2015)	-	209	2 y 6	-
De Koning y Vanhoucke (2016)	-	9	2 y 6	-
Khafri et al. (2018)	-	35	2	-
Kim et al. (2019)	-	451	2 y 4	-
Este estudio	4100	-	1-15	1 y 2

La mayoría de las investigaciones previas coincidieron en que los métodos 1 y 2 se caracterizan por ser los más estables a partir del 20% de ejecución del proyecto. Sin embargo, las bases de datos utilizadas en la mayoría de los estudios se limitaron a unos cuantos proyectos y programas del Departamento de Defensa de EEUU. Esto ha hecho que varios investigadores cuestionen los resultados de estas comparativas (De Koning y Vanhoucke, 2016). Adicionalmente, todos los estudios previos no concordaban en la forma de medir la 'estabilidad' y utilizaron indicadores ad-hoc para medirla (cada uno a su manera). Esto causó que la comparación transversal de sus resultados sea prácticamente imposible. Todas estas limitaciones son abordadas en este estudio.

4. Métodos de investigación

En este estudio, la estabilidad de los métodos EAC se calcula mediante los coeficientes de correlación paramétrica de Pearson, Spearman y Kendall. Por una parte, estos índices miden la correlación entre el costo estimado al término del proyecto en el momento presente (EAC) con el costo real (final) del proyecto. Pero indirectamente, también informan al gestor de proyectos acerca de lo volátiles que son esas estimaciones del costo final con respecto al valor real (solo conocido al terminar el proyecto).

Estos coeficientes de correlación proporcionan una medición más precisa de la estabilidad comparada con cualquier otro indicador utilizado en estudios previos tal como se justifica en la sección 4.2. No obstante, a modo de resumen, cuanto más se acerquen los valores de estos

coeficientes a 1, mayor es la correlación entre el costo pronosticado y el costo real del proyecto. Y a mayor correlación, también se tiene una menor dispersión (error) de los pronósticos, es decir, una mayor precisión. A continuación, antes de proporcionar más detalles sobre las métricas de correlación, se describe la base de datos de proyectos utilizados para simular la ejecución de proyectos.

4.1 Base de datos

Este estudio utiliza una base de datos compuesta de 4100 proyectos artificiales los cuales constan cada uno de una red de actividades en los nodos con diferentes relaciones de precedencia. Cada proyecto cuenta con 30 actividades no ficticias y 2 actividades ficticias. Estas últimas tan solo señalan el inicio y fin de cada proyecto.

La base de datos de 4100 proyectos fue creada con un generador de redes aleatorias robusto denominado RanGen2 (Demeulemeester, Vanhoucke y Herroelen, 2003). Tanto la base de datos como RanGen2 han sido utilizados en investigaciones previas de EVM por otros muchos investigadores (Ballesteros-Pérez et al., 2019). El mantenimiento de esta base de datos se lleva a cabo actualmente por el grupo de Investigación y Programación de Operaciones (OR&AS) de la Universidad de Gante (Bélgica). Esta y otras bases de datos pueden ser descargados en la siguiente web: <https://www.projectmanagement.ugent.be/research/data>

Por último, para asignar los valores (simulados) de duración y costos de las actividades se ha utilizado la distribución Lognormal. Estudios recientes sugieren que la distribución de las duraciones y costos de las actividades de proyectos reales se asemejan bastante a esta distribución (Trietsch et al., 2012). Adicionalmente, las distribuciones utilizadas generan costos parcialmente correlacionados con la duración de las actividades. Los valores de correlación empleados también se asemejan a los de proyectos de construcción reales (Ballesteros-Pérez et al., 2020). Finalmente, las 4100 actividades del proyecto se programan para comenzar lo antes posible, es decir, programación ASAP, y se asume que las actividades no se pueden interrumpir una vez han empezado.

4.2 Medición de la estabilidad de los métodos EAC

La estabilidad de los 15 métodos EAC se determina mediante los coeficientes de correlación lineal de Pearson (R), Spearman (ρ), y Kendall (τ) a intervalos de seguimiento de 10% del progreso de la duración real del proyecto.

La correlación R de Pearson tiene por objetivo indicar cómo de proporcionales son las estimaciones de los métodos EAC en cada período de seguimiento (AT) con el costo real final del proyecto (RAC). Cuanto más cercano sea a 1, los valores de RAC serán más 'linealmente' proporcionales a nuestras estimaciones EAC en cada intervalo de progreso del proyecto. El índice de correlación de Pearson R se calcula como:

$$R_{AT} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{\sum_{k=1}^K (EAC)_{AT} - \overline{(EAC)_{AT}})(RAC_{mk} - \overline{RAC_{mk}})}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (EAC)_{AT} - \overline{(EAC)_{AT}})^2} \sqrt{\sum_{k=1}^K (RAC_{mk} - \overline{RAC_{mk}})^2}} \right\} \quad (1)$$

Donde $\overline{(EAC)_{AT}}$ representa el promedio de las estimaciones de EAC en el período de seguimiento AT en las todas las simulaciones realizadas para ese proyecto. Concretamente, en nuestro estudio, cada proyecto se simula 100 veces, es decir, $K=100$ para los $m=1, 2, \dots, 4100$ proyectos. $\overline{RAC_{mk}}$ representa el promedio de los valores de RAC del proyecto m en las K simulaciones.

El siguiente coeficiente utilizado en este estudio es el coeficiente de correlación de rango de Spearman ρ . Su principal objetivo es detectar relaciones no lineales entre las estimaciones de

EAC y los valores de RAC. ρ también se calcula en cada período de seguimiento AT y su formulación es la siguiente:

$$\rho_{AT} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left\{ 1 - \left(\frac{6 \sum_{k=1}^K d_{mk}^2}{K(K^2-1)} \right) \right\} \quad (2)$$

Donde d_{mk} es la diferencia entre los valores de clasificación de orden de EAC_{AT} y RAC_{mk} para el proyecto m , para las 100 simulaciones K y en un período de seguimiento determinado AT . Concretamente, $d_{mk} \equiv posición(EAC)_{AT}^k - posición(RAC)_{mk}$ para $k=1,2...K$.

Por último, este estudio utiliza el coeficiente de correlación de rango de Kendall τ . Este coeficiente tiene por objetivo medir el grado de asociación entre dos variables. Los cálculos involucrados en el coeficiente de Kendall τ son proporcionales a las ejecuciones, es decir K^2 . En este estudio son 10.000, debido a que se simulan 100 ejecuciones de cada proyecto. La fórmula del coeficiente de Kendall τ en un determinado periodo de seguimiento AT es:

$$\tau_{AT} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{4P_m}{K(K-1)} - 1 \right\} \quad (3)$$

Donde P_m representa el número de pares concordantes entre las estimaciones de EAC en cada intervalo AT y los valores finales de RAC para cada proyecto m , es decir:

$$P_m = \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{\ell=k+1}^K 1\{((EAC)_{AT}^\ell - (EAC)_{AT}^k)(RAC_{mk}^\ell - RAC_{mk}^k) > 0\} \quad (4)$$

Donde $1(\cdot)$ es un operador binario que resulta 1 cuando se cumple la condición y 0 cuando no se cumple la condición.

5. Resultados

Los resultados de estabilidad de los 15 métodos EAC para los 4100 proyectos simulados se muestran en la Figura 1 (siguiente página). La estabilidad de los métodos está representada por los coeficientes de Pearson R , Spearman ρ y Kendall τ , los cuales pueden oscilar matemáticamente entre -1 y 1. De cualquier forma, si el coeficiente de correlación es cercano a 0, el método no es nada estable. Por el contrario, si la correlación es cercana a 1, el método es más estable e indirectamente también más preciso. En este estudio, se ha asumido que los métodos EAC logran una estabilidad moderadamente alta cuando el coeficiente de correlación es superior a 80%.

En consecuencia, la mayoría de los métodos EAC calculados con el índice de correlación Pearson R tienden a ser estables a partir del 70% de avance del proyecto. Los métodos 1, 2, 5, 8 y 11 se destacan entre los más estables cuando el periodo de seguimiento se realiza a intervalos de 10% de AT . Particularmente, los métodos 1 y 2 obtienen los mejores resultados en términos de correlación lineal, pero cercanamente seguidos de los métodos 5, 8 y 11.

Los resultados de comparativos de los métodos EAC calculados con coeficiente de correlación Spearman ρ son muy similares a los obtenidos con la correlación lineal de Pearson. Particularmente, a partir del 70% de avance del proyecto, los métodos 1, 2, 5, 8 y 11 son también los más estables.

Finalmente, los métodos EAC calculados con coeficiente de correlación Kendall τ se estabilizan más tarde respecto los índices de correlación Pearson y Spearman. Particularmente, sólo hasta que el proyecto ha progresado hasta aproximadamente un 83%, la correlación de Kendall sería superior al 80%. Los métodos 1, 2, 5, 8 y 11, eso sí, siguen siendo los más estables. No obstante, los métodos 4, 7 y 12 no muestran resultados tan diferentes de los primeros cinco.

Figura 1: Estabilidad de los métodos EAC calculada con Pearson, Spearman Kendall

			<i>Promedios Pearson's r</i>											
<i>AT (% RD)▶</i>			0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
ID	Método	EAC	0,00	0,33	0,41	0,49	0,57	0,65	0,74	0,82	0,90	0,96	1,00	Media
1	EVM	V1	0,00	0,40	0,52	0,62	0,70	0,77	0,83	0,88	0,93	0,97	1,00	0,76
2	EVM	V2	0,00	0,40	0,51	0,61	0,69	0,76	0,82	0,88	0,93	0,97	1,00	0,76
3	EVM	V3	0,00	0,26	0,33	0,40	0,49	0,59	0,70	0,81	0,90	0,97	1,00	0,64
4	EVM	V4	0,00	0,35	0,42	0,49	0,57	0,65	0,74	0,83	0,90	0,97	1,00	0,69
5	EVM	V5	0,00	0,40	0,50	0,60	0,68	0,75	0,82	0,88	0,93	0,97	1,00	0,75
6	EVM	ES1	0,00	0,24	0,30	0,38	0,47	0,58	0,69	0,79	0,89	0,96	1,00	0,63
7	EVM	ES2	0,00	0,34	0,41	0,49	0,56	0,64	0,73	0,81	0,89	0,96	1,00	0,68
8	EVM	ES3	0,00	0,40	0,50	0,60	0,68	0,75	0,82	0,88	0,93	0,97	1,00	0,75
9	EVM	SP1	0,00	0,34	0,40	0,45	0,51	0,57	0,64	0,71	0,79	0,88	0,96	0,63
10	ESM	ESM1	0,00	0,23	0,29	0,37	0,46	0,57	0,68	0,79	0,88	0,96	1,00	0,62
11	ESM	ESM2	0,00	0,40	0,51	0,60	0,68	0,75	0,82	0,88	0,93	0,97	1,00	0,75
12	ESM	ESM3	0,00	0,33	0,40	0,47	0,55	0,63	0,72	0,80	0,89	0,96	1,00	0,67
13	XSM	XSM1	0,00	0,29	0,37	0,44	0,52	0,62	0,72	0,82	0,91	0,97	1,00	0,66
14	XSM	XSM2	0,00	0,29	0,35	0,41	0,49	0,59	0,69	0,79	0,89	0,96	1,00	0,65
15	XSM	XSM3	0,00	0,34	0,39	0,46	0,53	0,61	0,69	0,78	0,87	0,95	1,00	0,66

			<i>Promedios Spearman's rho</i>											
<i>AT (% RD)▶</i>			0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
ID	Método	EAC	0,00	0,34	0,43	0,51	0,60	0,67	0,75	0,83	0,89	0,96	1,00	Media
1	EVM	V1	0,00	0,39	0,51	0,60	0,68	0,75	0,81	0,87	0,92	0,97	1,00	0,75
2	EVM	V2	0,00	0,40	0,51	0,60	0,68	0,75	0,81	0,87	0,92	0,97	1,00	0,75
3	EVM	V3	0,00	0,28	0,37	0,45	0,54	0,63	0,72	0,81	0,89	0,96	1,00	0,67
4	EVM	V4	0,00	0,37	0,46	0,54	0,62	0,69	0,76	0,84	0,90	0,96	1,00	0,71
5	EVM	V5	0,00	0,39	0,50	0,59	0,67	0,75	0,81	0,87	0,92	0,97	1,00	0,75
6	EVM	ES1	0,00	0,26	0,34	0,42	0,52	0,62	0,71	0,80	0,89	0,96	1,00	0,65
7	EVM	ES2	0,00	0,36	0,45	0,53	0,61	0,68	0,76	0,83	0,90	0,96	1,00	0,71
8	EVM	ES3	0,00	0,40	0,50	0,59	0,68	0,75	0,81	0,87	0,92	0,97	1,00	0,75
9	EVM	SP1	0,00	0,35	0,43	0,49	0,55	0,60	0,66	0,72	0,78	0,87	0,95	0,64
10	ESM	ESM1	0,00	0,25	0,33	0,41	0,51	0,61	0,71	0,80	0,88	0,96	1,00	0,65
11	ESM	ESM2	0,00	0,39	0,50	0,59	0,68	0,75	0,81	0,87	0,92	0,97	1,00	0,75
12	ESM	ESM3	0,00	0,35	0,44	0,52	0,60	0,68	0,75	0,83	0,90	0,96	1,00	0,70
13	XSM	XSM1	0,00	0,30	0,38	0,46	0,55	0,64	0,73	0,82	0,90	0,96	1,00	0,67
14	XSM	XSM2	0,00	0,29	0,37	0,44	0,53	0,62	0,71	0,80	0,89	0,96	1,00	0,66
15	XSM	XSM3	0,00	0,34	0,39	0,46	0,53	0,61	0,69	0,78	0,87	0,95	1,00	0,66

			<i>Promedios Kendall's tau</i>											
<i>AT (% RD)▶</i>			0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
ID	Método	EAC	0,00	0,24	0,31	0,38	0,45	0,52	0,60	0,68	0,77	0,87	0,98	Media
1	EVM	V1	0,00	0,28	0,37	0,45	0,52	0,59	0,66	0,73	0,81	0,89	0,98	0,63
2	EVM	V2	0,00	0,28	0,37	0,45	0,52	0,59	0,66	0,73	0,81	0,89	0,99	0,63
3	EVM	V3	0,00	0,19	0,26	0,33	0,41	0,49	0,57	0,67	0,77	0,88	0,98	0,56
4	EVM	V4	0,00	0,26	0,33	0,40	0,47	0,53	0,61	0,69	0,78	0,88	0,99	0,59
5	EVM	V5	0,00	0,28	0,37	0,44	0,51	0,58	0,65	0,73	0,80	0,89	0,99	0,62
6	EVM	ES1	0,00	0,18	0,24	0,31	0,38	0,47	0,56	0,65	0,76	0,87	0,98	0,54
7	EVM	ES2	0,00	0,25	0,32	0,39	0,46	0,53	0,60	0,68	0,77	0,87	0,98	0,59
8	EVM	ES3	0,00	0,28	0,37	0,44	0,52	0,58	0,65	0,73	0,80	0,89	0,99	0,63
9	EVM	SP1	0,00	0,25	0,30	0,36	0,40	0,45	0,50	0,56	0,63	0,73	0,86	0,50
10	ESM	ESM1	0,00	0,17	0,23	0,30	0,37	0,46	0,55	0,65	0,75	0,87	0,98	0,53
11	ESM	ESM2	0,00	0,28	0,37	0,44	0,52	0,59	0,66	0,73	0,80	0,89	0,99	0,63
12	ESM	ESM3	0,00	0,24	0,31	0,38	0,45	0,52	0,59	0,68	0,77	0,87	0,98	0,58
13	XSM	XSM1	0,00	0,20	0,27	0,34	0,41	0,49	0,58	0,67	0,77	0,88	0,98	0,56
14	XSM	XSM2	0,00	0,20	0,26	0,32	0,39	0,47	0,56	0,65	0,76	0,87	0,98	0,55
15	XSM	XSM3	0,00	0,24	0,28	0,33	0,40	0,46	0,54	0,63	0,74	0,86	0,98	0,55

Analizada la Figura 1, el resumen comparativo de los métodos EAC que han obtenido los mejores resultados de estabilidad se presentan en la Figura 2. En esta última figura se valoran cualitativamente los métodos por medio de ‘*’.

Figura 2: Resumen de la comparativa de estabilidad de los 15 métodos EAC

Valores Medios (% RD)►			Estabilidad			(Destacados)			Mejor
ID	Método	EAC	R	ρ	τ	R	ρ	τ	
1	EVM	V1	0.76	0.75	0.63	***	**	**	***
2	EVM	V2	0.76	0.75	0.63	***	**	**	***
3	EVM	V3	0.64	0.67	0.56		*		
4	EVM	V4	0.69	0.71	0.59	*	*	*	*
5	EVM	V5	0.75	0.75	0.62	**	**	**	**
6	EVM	ES1	0.63	0.65	0.54				
7	EVM	ES2	0.68	0.71	0.59	*	*	*	*
8	EVM	ES3	0.75	0.75	0.63	**	**	**	**
9	EVM	SP1	0.63	0.64	0.50				
10	ESM	ESM1	0.62	0.65	0.53				
11	ESM	ESM2	0.75	0.75	0.63	**	**	**	**
12	ESM	ESM3	0.67	0.70	0.58	*	*	*	*
13	XSM	XSM1	0.66	0.67	0.56				
14	XSM	XSM2	0.65	0.66	0.55				
15	XSM	XSM3	0.66	0.66	0.55				

Los métodos 1 y 2 destacan (aunque solo marginalmente) sobre los métodos 5, 8 y 11 en términos de estabilidad. Ambos métodos consideran un factor de rendimiento (PF). Concretamente, $PF=1$ en el método 1 y $PF=CPI$ en el método 2. Por tanto, los métodos más estables para predecir el costo final del proyecto son matemáticamente los más sencillos, es decir, $EAC = AC + (BAC - EV)$ y $EAC = AC + (BAC - EV)/CPI$.

6. Discusión

Estudios previos como los indicados en la Tabla 2 definieron (arbitrariamente) que un método de predicción de costo en EVM se podía considerar ‘estable’ cuando su variabilidad se mantenía dentro de un rango del 10% de variación (Payne, 1990; Christensen y Heise, 1992). Sin embargo, variaciones inferiores a este 10% se conseguía en porcentajes de progreso del proyecto muy diferentes entre diferentes investigadores. Por ejemplo, Henderson y Zwikael (2008) concluyeron que los métodos EAC se estabilizaban una vez se alcanzaba aproximadamente el 20% de avance del proyecto. Pero otros autores, como Petter et al. (2015) y Kim et al. (2019), determinaron que la estabilidad de los métodos EAC no se lograba antes del 55% o incluso del 80% de avance del proyecto, respectivamente.

En nuestro caso, los resultados de la Figura 1 podrían ser interpretados de forma análoga. Una correlación del 90% no significa, sin embargo, que la variación del método EAC en cuestión sea inferior al 10%. No obstante, es evidente que nuestros resultados están en el rango de los resultados obtenidos por Petter, Ritschel y White (2015) y Kim et al. (2019).

Adicionalmente, los resultados de estabilidad se han medido en esta ocasión con tres coeficientes de correlación distintos. Estos coeficientes muestran grados de correlación numérica (Pearson), de orden (Spearman) y concordancia (Kendall). También miden correlaciones lineales (Pearson) y no lineales (Spearman y Kendall), lo que hace sus resultados mucho más representativos a efectos de medición de la volatilidad de los métodos.

Por último, se han comparado 15 métodos EAC, utilizando una amplia base de datos de proyectos con distintas estructuras topológicas (redes de precedencia), y duraciones y costos de las actividades también similares a aquellas de proyectos de construcción. Todos estos esfuerzos hacen de nuestra comparativa, un estudio mucho más amplio y representativo que los estudios previos encontrados en la literatura sobre EVM, los cuales usaron muy pocos proyectos.

7. Conclusión

El Análisis o Gestión de Valor Ganado (*Earned Value Management*, EVM) es una técnica utilizada para realizar seguimiento y control de la duración y costos en proyectos. A pesar de las innumerables investigaciones realizadas en EVM, ninguna de ellas había medido el rendimiento de la estabilidad de gran parte de las extensiones que dispone EVM para pronosticar el costo final del proyecto. Esta es una de las principales contribuciones de este estudio.

Concretamente, este estudio ha comparado 15 métodos deterministas de pronóstico del costo o EAC del proyecto. Para medir la estabilidad de los métodos se han utilizado los coeficientes de correlación de Pearson, Spearman y Kendall. Los proyectos utilizados para medir las correlaciones entre los distintos pronósticos del costo del proyecto en diferentes momentos de avance y el costo final (real) del proyecto ha sido una base de datos de 4100 proyectos. Cada uno de los 4100 proyectos ha sido simulado 100 veces y sus diferentes valores de costo convenientemente registrados para poderlos comparar con los pronósticos de los métodos EAC según avanzaban los proyectos.

Los resultados muestran que los proyectos se vuelven más estables en promedio entre el 70% y el 80% de avance de los proyectos. Antes del 50% de avance del proyecto, sin embargo, casi todos los métodos son bastante inestables.

Los métodos más estables son los matemáticamente más sencillos. En concreto, los métodos $EAC = AC + (BAC - EV)$ y $EAC = AC + (BAC - EV)/CPI$ destacan como los mejores.

La estabilidad de los métodos EAC está basada sobre una base de datos de proyectos artificiales (no reales), lo cual es una clara limitación de este estudio. Futuros estudios podrían incluir proyectos reales y recientes para hacer los resultados más representativos. También, sería aconsejable incluir extensiones de EVM no deterministas. Sin embargo, debido a la gran cantidad de datos analizados, esperamos que estos resultados del presente estudio puedan ser de utilidad a profesionales del área gestión de proyectos que necesiten anticipar el costo final de proyectos.

Referencias

- Anbari, F. (2003). Earned value project management method and extensions. *IEEE Engineering Management Review*, 32(3), 97–97.
<https://doi.org/10.1109/EMR.2004.25113>
- Anysz, H., & Buczkowski, B. (2019). The association analysis for risk evaluation of significant delay occurrence in the completion date of construction project. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(9), 5369–5374.
<https://doi.org/10.1007/s13762-018-1892-7>
- Anysz, Hubert. (2019). Managing delays in construction projects aiming at cost overrun minimization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 603(3).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/3/032004>
- Ballesteros-Pérez, P., Sanz-Ablanedo, E., Mora-Melià, D., González-Cruz, M. C., Fuentes-Bargues, J. L., & Pellicer, E. (2019). Earned schedule min-max: Two new EVM metrics for monitoring and controlling projects. *Automation in Construction*, 103, 279–290.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.016>
- Ballesteros-Pérez, P., Sanz-Ablanedo, E., Soetanto, R., González-Cruz, M. C., Larsen, G. D., & Cerezo-Narváez, A. (2020). Duration and cost variability of construction activities: An empirical study. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(1).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001739](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001739)
- Barrientos-Orellana, A., Ballesteros-Pérez, P., Mora-Melià, D., González-Cruz, M. C., & Vanhoucke, M. (2022). Stability and accuracy of deterministic project duration

- forecasting methods in earned value management. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(3), 1449–1469. <https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2020-1045>
- Batselier, J., & Vanhoucke, M. (2017). Improving project forecast accuracy by integrating earned value management with exponential smoothing and reference class forecasting. *International Journal of Project Management*, 35(1), 28–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.10.003>
- Christensen, D., & Payne, K. (1992). Cost performance index stability: Fact or fiction? *Journal of Parametrics*, 12(1), 27–40. <https://doi.org/10.1080/10157891.1992.10462509>
- Christensen, D. S. (1999). Using the earned value cost management report to evaluate the contractor's estimate at completion. *Acquisition Review Quarterly*, 6(3), 283–296.
- Christensen, D., & Templin, C. (2002). EAC evaluation methods: do they still work? *Acquisition Review Quarterly*, 9(2), 105–117.
- de Andrade, P. A., Martens, A., & Vanhoucke, M. (2019). Using real project schedule data to compare earned schedule and earned duration management project time forecasting capabilities. *Automation in Construction*, 99, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.030>
- De Koning, P., & Vanhoucke, M. (2016). Stability of earned value management do project characteristics influence the stability moment of the cost and schedule performance index. *Journal of Modern Project Management*, 4(1), 9–25.
- Demeulemeester, E., Vanhoucke, M., & Herroelen, W. (2003). RanGen: A random network generator for activity-on-the-node networks. *Journal of Scheduling*, 6(1), 17–38. <https://doi.org/10.1023/A:1022283403119>
- Henderson, K., & Zwikael, O. (2008). Does project performance stability exist? A re-examination of CPI and evaluation of SPI(t) stability. *CrossTalk*, 21(4), 7–13.
- Khafri, A. A., Dawson-Edwards, J., Simpson, R., & Abourizk, S. (2018). Empirical study of relationship between cost performance index stability and project cost forecast accuracy in industrial construction projects. *CSCE General Conference 2018, Held as Part of the Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference 2018*, 269–276.
- Khamooshi, H., & Golafshani, H. (2014). EDM: Earned duration management, a new approach to schedule performance management and measurement. *International Journal of Project Management*, 32(6), 1019–1041. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.11.002>
- Khamooshi, Homayoun, & Abdi, A. (2017). Project duration forecasting using earned duration management with exponential smoothing techniques. *Journal of Management in Engineering*, 33(1), 04016032. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000475](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000475)
- Kim, D. B., White, E. D., Ritschel, J. D., & Millette, C. A. (2019). Revisiting reliability of estimates at completion for department of defense contracts. *Journal of Public Procurement*, 19(3), 186–200. <https://doi.org/10.1108/JOPP-02-2018-0006>
- Lipke, W. (2003). Schedule is different. *The Measurable News*, 2(January), 31–34.
- Lipke, W. (2012). Schedule adherence and rework. *CrossTalk*, 25(6), 4–8.
- Payne, K. (1990). An investigation of the stability of the cost performance index. In *Air Force Inst. of Tech Wright-Pattersonafb Oh*.
- Petter, J. L., Ritschel, J. D., & White, E. D. (2015). Stability properties in department of defense contracts: Answering the controversy. *Journal of Public Procurement*, 15(3), 341–364. <https://doi.org/10.1108/jopp-15-03-2015-b004>
- Trietsch, D., Mazmanyan, L., Gevorgyan, L., & Baker, K. R. (2012). Modeling activity times by the Parkinson distribution with a lognormal core: Theory and validation. *European Journal of Operational Research*, 216(2), 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.07.054>
- Wauters, M., & Vanhoucke, M. (2015). Study of the stability of earned value management forecasting. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000947](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000947)

