



Propuesta metodológica para la determinación de rendimiento de maquinaria pesada en la construcción, caso Colombia

Elkin Darío Cañón Buitrago¹

edcanonb@udistrital.edu.co

<https://orcid.org/0000-0001-7899-5093>

Adriana Marcela Benavides Zambrano

Adriana.benavides@esmic.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-3257-7894>

Wilson Ernesto Vargas Vargas

wevargasv@udistrital.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-3040-6661>

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá – Colombia

RESUMEN

Se presenta la propuesta metodológica para la determinación de rendimientos de maquinaria pesada en procesos de construcción vial, específicamente para Colombia, dicha metodología contempla la toma de información primaria que permita respaldar esta investigación. Además, se presentan factores relevantes como los humanos, naturaleza del terreno y altitud entre otros, éste último será descrito y llamado como factor de ajuste por altitud, que influyen directamente en el rendimiento de la maquinaria pesada para actividades de construcción.

Esta metodología tiene como finalidad proponer pautas necesarias a la hora de medir el rendimiento de una maquina en labores comunes en procesos constructivos, tales como excavación o movimientos de tierra, esta investigación está apoyada en documentos técnicos como fichas de maquinaria pesada y parte de la investigación realizada por el ingeniero Walter Ibañez quien determinó factores de ajuste al rendimiento de la maquinaria según su altitud en Perú.

Palabras clave: *rendimiento; maquinaria pesada; factor por altitud; productividad; excavación; movimiento de tierras.*

¹ Autor Principal

Methodological proposal for determining the performance of heavy machinery in construction, Colombia case

ABSTRACT

The methodological proposal for the determination of heavy machinery yields in road construction processes is presented, specifically for Colombia, said methodology contemplates the collection of primary information to support this research. In addition, relevant factors such as humans, nature of the terrain and altitude among others are presented, the latter will be described and called as an altitude adjustment factor, which directly influence the performance of heavy machinery for construction activities.

This methodology must propose necessary guidelines when measuring the performance of a machine in common tasks in construction processes, such as excavation or earthworks, this research is supported by technical documents such as sheets of heavy machinery and part of the research made by the engineer Walter Ibañez who determined adjustment factors to the performance of the machinery according to its altitude.

***Keywords:** yield; heavy machinery; altitude factor; productivity; excavation; earthworks.*

Artículo recibido 15 febrero 2023

Aceptado para publicación: 15 marzo2023

INTRODUCCIÓN

Uno de los factores importantes en la estructuración de los Análisis de Precios Unitarios (APU) es la determinación de los rendimientos de la maquinaria en la ejecución de actividades comunes tales como excavaciones y movimientos de tierras, dentro de la construcción de infraestructura vial.

En la actualidad el Instituto Nacional de Vías INVIAS periódicamente publica su lista de precios de referencia y APU para cada una de las territoriales en las que se encuentra repartida la institución para su cobertura nacional, dentro de dichos análisis, se pueden observar los rendimientos de la maquinaria propuesta para cada una de las actividades contempladas en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2013 (vigente a la fecha), sin embargo, es de resaltar que los valores allí consignados se encuentran en función de la productividad de la maquinaria y no función del rendimiento. En este momento no hay ningún tipo de aplicativo especializado en el cálculo de rendimientos de maquinaria para proyectos civiles, que abarque las actividades requeridas en una obra correspondientes al movimiento de tierras. (López Zabála & Rodríguez Montes, 2018).

METODOLOGÍA

¿Qué es Rendimiento?

Para poder plantear una metodología es importante primero definir el concepto de rendimiento, el cual hace referencia al tiempo requerido por una máquina para ejecutar una unidad de una actividad específica, ejemplo 1m³ de excavación o 1m³ de movimiento de material, por lo cual las unidades están dadas en fracciones de hora. Actualmente como se contemplan los rendimientos propuestos por el INVIAS son cantidades de unidades realizadas por hora, lo cual está en función de la productividad.

Factores que influyen en la determinación de rendimientos

Al momento de establecer valores de rendimiento, es importante tener presente aquellos factores relevantes que inciden directamente en la eficiencia de la maquinaria, lo cual afecta directamente el rendimiento de estas. Entre los factores más relevantes se tienen:

- Humanos
- Resistencia al Rodamiento
- Pendiente del terreno o Topografía

- Condiciones de clima
- Tipo de material
- Actividad ejecutada
- Altitud sobre el nivel medio del mar

Factores Humanos: Hacen referencia a la destrezas y habilidades que posee un operario de una maquina pesada para ejecutar una labor en particular. Generalmente se establece un factor de 0.75 para calificar dicho factor.

Resistencia al rodamiento: Hace referencia a la fuerza que se contrapone por parte del terreno, al giro o maniobrabilidad de la maquinaria, es decir, una vez sea vencida dicha fuerza se llevará a cabo el movimiento de la máquina. Esto a su vez depende de las condiciones del labrado de las llantas, presión de inflado, al igual que el tipo de terreno sobre el cual se está trabajando.

Pendiente del terreno o topografía: Hacen referencia a la inclinación del terreno, el cual genera resistencia al movimiento de la máquina. Cuando la pendiente es negativa, la fuerza de gravedad actúa favorablemente sobre dicha pendiente.

Clima: Hacen referencia a las condiciones climáticas presentes en el lugar de trabajo, dichas condiciones afectan considerablemente la maniobrabilidad de la maquinaria, la lluvia, los vientos e incluso la temperatura.

Tipo de material: Hacen referencia al tipo de material presente en el lugar de la obra, dentro de los cuales los más representativos son material suelto, roca suelta y roca fija.

Actividad ejecutada: Hacen referencia a la reducción en la potencia de un motor por disminución de la presión atmosférica, lo cual se refleja en el bajo rendimiento a mayor altura.

Altitud sobre el nivel medio del mar: Hacen referencia a la reducción en la potencia de un motor por disminución de la presión atmosférica, lo cual se refleja en el bajo rendimiento a mayor altura.

Dentro de la maquinaria pesada más común en construcción de infraestructura vial encontramos las siguientes (Fonseca & Lopez Orozco, 2011):

- Retroexcavadoras
- Bulldozer
- Rodillos

- Motoniveladoras
- Cargadores

La altitud es uno de los factores por los que el rendimiento calculado es menor al rendimiento teórico. (Hulngo Calua, 2013), para asignar el factor por altitud, fue necesario referenciar las altitudes en las cuales se ubica nuestro país, para ello se determinó las alturas promedio sobre el nivel del mar de los 1122 municipios que conforman el territorio nacional, posteriormente se agruparon las alturas en tres (3) regiones así:

Tabla 1 División regional por altitud sobre nivel medio del mar

Región	Altitud media (msnmm)
Región 1	0-1000
Región 2	1001-2300
Región 3	2301-3800

Fuente: Elaboración propia

Dentro del factor de ajuste por altitud, se contempla el tipo de material del suelo sobre la cual actúa la maquina al desarrollar una actividad específica, evaluándose con factores adicionales mencionados al final de cada tabla, el factor final de corrección es el consignado en cada una de las tablas una vez se ha hecho la respectiva operación según el estudio realizado por el Ingeniero Walter Ibañez consignado en su documento Costos y Tiempos en Carreteras en su primera edición.

Factor de ajuste por altitud en retroexcavadoras

Se contemplan los siguientes factores de ajuste para cada una de las regiones establecidas:

Tabla 2 División regional por altitud sobre nivel medio del mar

RETROEXCAVADORAS				
Altitud		0-1000	1000-2300	2300-3800
Factor de Ajuste	Material suelto	0.44	0.41	0.38
	Roca Suelta	0.26	0.25	0.23
	Roca fija/Volad.	0.18	0.17	0.16
	Promedio	0.293	0.277	0.257
	Rendimiento Normal	-6%	-7%	

Fuente: Adaptado de (Ibañez, 2010)

Los Factores de corrección contemplan las siguientes variables:

- Capacidad de Operador
- Altura
- Visibilidad
- Eficiencia del trabajo – Ciclo
- Tipo de Material
- Maniobrabilidad
- Factor de acarreo

Factor de ajuste por altitud en bulldozer

Se contemplan los siguientes factores de ajuste para cada una de las regiones establecidas:

Tabla 3 Factor de Ajuste por Altitud-Bulldozer

BULLDOZER				
Altitud		0-1000	1000-2300	2300-3800
Factor de Ajuste	Material suelto	0.459	0.393	0.322
	Roca Suelta	0.315	0.301	0.25
	Roca fija/Volad.	0.253	0.242	0.201
	Promedio	0.342	0.312	0.258
	Rendimiento Normal	-9%	-17%	

Fuente: Adaptado de (Ibañez, 201)

Los Factores de corrección contemplan las siguientes variables:

- Capacidad de Operador
- Altura
- Visibilidad
- Eficiencia del trabajo – Ciclo
- Tipo de Material
- Pendiente
- Maniobrabilidad

Factor de ajuste por altitud en rodillos

Se contemplan los siguientes factores de ajuste para cada una de las regiones establecidas:

Tabla 4 Factor de Ajuste por Altitud-Rodillos

		RODILLOS			
		Altitud	0-1000	1000-2300	2300-3800
Factor de Ajuste	Autopropulsados y de Tiro		0.444	0.435	0.364
			0.444	0.435	0.364
			0.444	0.435	0.364
	Promedio	0.444	0.435	0.364	
		Rendimiento Normal	-2%	-16%	

Fuente: Adaptado de (Ibañez, 2010)

Los Factores de corrección contemplan las siguientes variables:

- Capacidad de Operador
- Altura
- Eficiencia del trabajo – Ciclo
- Pendiente del terreno
- Maniobrabilidad
- Factor de Traslape

Factor de ajuste por altitud en motoniveladoras

Se contemplan los siguientes factores de ajuste para cada una de las regiones establecidas:

Tabla 5 Factor de Ajuste por Altitud-Motoniveladoras

MOTONIVELADORAS				
Altitud		0-1000	1000-2300	2300-3800
Factor de Ajuste	Acab. Subrasante en corte	0.86	0.84	0.76
	Conformación de terraplén	0.96	0.94	0.85
	Subbase seleccionada C= 0.15 m	0.77	0.75	0.68
	Subbase seleccionada C= 0.20 m	0.69	0.67	0.61
	Base Granular C= 0.15 m	0.68	0.65	0.59
	Base Granular C= 0.20 m	0.6	0.59	0.53
	Escarificado	0.93	0.91	0.82
	Promedio	0.784	0.764	0.691
		Rendimiento Normal	-3%	-10%

Fuente: Adaptado de (Ibañez, 2010)

Factor de ajuste por altitud en cargadores

Se contemplan los siguientes factores de ajuste para cada una de las regiones establecidas:

Tabla 6 Factor de Ajuste por Altitud-Cargadores

CARGADORES				
Altitud		0-1000	1000-2300	2300-3800
Factor de Ajuste	Material suelto	0.566	0.515	0.458
	Roca Suelta	0.566	0.515	0.458
	Roca fija	0.566	0.515	0.458
	Promedio	0.566	0.515	0.458
		Rendimiento Normal	-9%	-11%

Fuente: Adaptado de (Ibañez, 2010)

Los Factores de corrección contemplan las siguientes variables:

- Capacidad de Operador
- Altura
- Visibilidad
- Eficiencia del trabajo – Ciclo

Como se puede evidenciar, existe una reducción del rendimiento a medida que aumenta la altura media sobre el nivel del mar, la cual debe ser considerada a la hora de establecer rendimientos en las actividades contempladas dentro de la construcción de infraestructura vial.

Métodos para determinar el rendimiento de la maquinaria

Existen dos métodos para determinar rendimientos de maquinaria, estos son directos e indirectos. (Bazauri Briones & Tauma Bobadilla, 2019) El método directo permite mediante una metodología establecida, la captura de información suficiente y necesaria para estimar los rendimientos directamente en obra, bajo las diferentes condiciones en las que se ejecutan los proyectos viales. Este documento pretende proporcionar una metodología mínima y simple de recolección de información para determinar mediante medias directas en campo el rendimiento de las máquinas anteriormente mencionadas. Por otro lado dentro de los métodos indirectos encontramos uno que consiste en el cálculo apoyado en fórmulas matemáticas las cuales proporcionan el rendimiento de la maquinaria según sus capacidades, ciclo de trabajo y según el tipo de actividad a desempeñar y otro que consiste en las fichas técnicas, elaboradas y suministradas por los fabricantes de maquinaria pesada, según las condiciones de fábrica y su condición no considera desgaste, estas dos son bastante teóricas y muchas veces alejadas de la realidad.

Metodología para la medición de rendimientos en maquinaria pesada

Haciendo uso del método de observación directa (en campo) se propone los siguientes pasos:

1. Es necesario en primera instancia determinar la ubicación del proyecto vial, como es bien conocido, en Colombia encontramos diferentes condiciones topográficas (terreno plano, ondulado, montañoso o escarpado) que favorecen o no, el desarrollo de actividades de construcción.
2. Una vez ubicada la región, se procederá a registrar las condiciones de clima existentes durante la labor desarrollada, (lluvia, nublado, soleado).
3. Apoyados en el estudio de suelos de la zona de trabajo, el cual determina las características del suelo existente, registrar el tipo de material sobre el cual se procederá a realizar la actividad.
4. Posteriormente se debe registrar la actividad a realizar (excavación y tipo de excavación, movimiento de tierras, remoción de derrumbes, extendido de material, entre otros).

5. Consignar el tipo de maquinaria con la cual ejecuta la actividad descrita anteriormente (tamaño y capacidad, fuerza del motor, tipo de combustible, entre otros).
6. Monitorear el tiempo requerido de dicha máquina para completar un ciclo de trabajo, es decir, carga, acarreo, descarga y retorno. Posteriormente cuantificar el número de ciclos realizados en una hora efectiva de trabajo.
7. Una vez determinada la cantidad de ciclos en una hora de trabajo, realizar la medición de la cantidad de material removido, excavado o transportado, según sea la acción. Dicha medición puede realizarse empleando métodos topográficos o basados en la capacidad de la máquina.
8. Una vez determinadas las variables, emplear la siguiente relación.

$$\frac{(01)hora}{(volumen, area \acute{o} unidades que se ejecutan)} = Rendimiento$$

CONCLUSIONES

- El objetivo principal del sistema de gestión vial es la optimización de los recursos, minimizando costos y prolongando la vida útil del pavimento por medio de mantenimiento periódico o rutinario.
- El óptimo funcionamiento del sistema depende del suministro continuo de información por medio de inspecciones periódicas y la toma de decisiones en el momento oportuno evitando la malversación de dinero garantizando la correcta operación de las vías.
- Al adecuar el sistema de gestión vial de un tamaño micro como lo es un barrio a uno tipo macro como una ciudad es necesario involucrar las variables clima y subrasante con el fin de acercar al modelo a las condiciones reales de operación de la red vial.
- Hay que tener en cuenta los desvíos generados debido a la rehabilitación de una vía ya que el tránsito que esta soportaba será trasladada a las vías aledañas perjudicando el normal desarrollo del sistema de gestión. Esta información podrá ser suministrada por la entidad encargada de la movilidad de la ciudad.

RECOMENDACIONES

- De hacer uso de las fichas técnicas suministradas por el fabricante o de aquellos datos históricos con los que se cuente, se recomienda afectarlos por el factor de altitud descrito en este documento, con el fin de obtener un valor más acorde a la realidad y a las condiciones topográficas del país.
- Es importante establecer un esquema de captura de información que propenda por mejorar la toma de información en campo en cuanto a rendimientos se refiere. Los formatos, medios y modos de captura pueden ser propuestos por cada consultoría o interventoría con el fin de consignar los datos mínimos anteriormente mencionados, no obstante, dichos datos pueden ser adaptados y complementados según se requiera.

LISTA DE REFERENCIAS

- Bazauri Briones, E. S., & Tauma Bobadilla, L. A. (2019). Comparación del rendimiento en campo y las especificaciones del fabricante de la maquinaria pesada en una mina de Cajamarca. Cajamarca - Perú: Universidad Privada del Norte.
- Fonseca, J. E., & Lopez Orozco, L. M. (2011). Guía Práctica de Maquinaria Adecuada para la Construcción de Proyectos Viales. Medellín: Universidad de Medellín.
- Hulngo Calua, N. (2013). Evaluación de rendimiento de maquinaria pesada en la ejecución de cierres de mina - Caso Maqui Maqui Norte - Cajamarca. Cajamarca, Perú: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Ibañez, W. (2010). Costos y tiempos en carreteras. Lima: Empresa Editora Macro EIRL.
- Ibañez, W., (2012). Manual de Costos y Presupuestos de Obras Viales Tomo I, Lima, Perú.
- Ibañez, W., (2012). Manual de Costos y Presupuestos de Obras Viales Tomo II, Lima, Perú.
- López Zabála, J. N., & Rodríguez Montes, J. A. (2018). Aplicación informática para el cálculo de rendimientos y cantidades de maquinaria pesada para proyectos de obras civiles con énfasis en movimientos de tierra en Colombia. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Arroyo, Jorge & Segura, Paula Silvana. (2018). Cálculo de Productividad y Optimización del Equipo Pesado utilizado en Movimiento de Tierras. Vol 3. 28-35. 10.26910/issn.2528.

- Tiktin, J. (1997). Procedimiento Generales de Construcción Movimiento de tierras, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.
- Caterpillar, (2017). Manual de Rendimiento Caterpillar, Peoria, Illinois, EE.UU.
- Alvarado, J., (2018). Cálculo de productividad y costo horario de la maquinaria pesada en los trabajos de movimiento de tierras del proyecto hospital general de 120 camas de Durán en la Provincia del Guayas, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Galabru, P., (2015). Maquinaria General en Obras y Movimientos de Tierra, Barcelona, España.
- Análisis comparativo de especificaciones técnicas y rendimiento en campo de maquinaria para extracción de tierra, Luis Fernando Arévalo Ballén & Camilo Hernández Méndez/Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO/ Facultad de Ingeniería/Programa Ingeniería Civil, Sede Cundinamarca, Centro regional, Zipaquirá / 2014.
- González, I. (n.d.). APUNTES PARA LA CLASE Recopilados por: UNIVERISDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA Facultad de Ingeniería, Campus Mexicali. 2003.
- JOSÉ ELÍAS FONSECA, & LUZ MARINA LÓPEZ OROZCO. (2011). GUÍA PRÁCTICA DE MAQUINARIA ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PROYECTOS VIALES. UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN.
- Morales P. (2015). Construcción y Conservación de Vías, Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia.