

## Artículo de Investigación

# Nivelación de tierras: una opción viable para el uso eficiente y gestión sustentable del agua en la agricultura

Land leveling: a viable option for efficient use and sustainable water management in agriculture

**Manuel Navarro Álvaro**

Estudiante de ingeniería en irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. México-México  
(Autor de correspondencia)  
[navazman@hotmail.com](mailto:navazman@hotmail.com)

Fecha de envío: 30/09/2018

Fecha de revisión: 03/10/2018

Fecha de aprobación: 20/11/2018

DOI: 10.25054/22161325.2504

---

## Resumen

El incremento de la población y la demanda del agua para uso urbano como para el uso industrial es cada vez mayor; según la FAO, para el uso agrícola es alrededor del 72% y el 28% para uso urbano. Por lo que en muy poco tiempo esto llevará a un problema de escasez del agua. Siendo que la agricultura demanda más agua y en México solo el 18% de la superficie cultivada cuenta con infraestructura de riego, para tales casos, el riego por gravedad tiene eficiencias alrededor del 45% y los presurizados andan arriba de los 90%; convertir los sistemas de riego por gravedad a sistemas de riego presurizado y mejorar el riego por gravedad son opciones viables para hacer un uso eficiente y gestión sustentable del agua. Éste último se puede lograr a través de nivelación de tierras, revestimiento de canales, sustitución de canales por tuberías y diseño y manejo apropiado del riego parcelario. La nivelación de tierras pretende solucionar problemas de baja eficiencia de aplicación y deficiente uniformidad del riego ocasionados por irregularidades topográficas. Con el uso de la tecnología tradicional y/o tecnología laser se puede lograr nivelar el terreno agrícola con alta precisión y esto permite un avance del agua de manera más uniforme, vertical y horizontalmente, con lo cual se logran eficiencias de riego hasta un 85%.

**Palabras clave:** escasez; demanda; eficiencia; riego por gravedad

## Abstract

The increase of the population and the demand of the water for urban use as for the industrial use is increasing; according to the FAO, for agricultural use it is around 72% and 28% for urban use. So in a very short time this will lead to a problem of water shortage. Since agriculture demands more water and in Mexico only 18% of the cultivated area has irrigation infrastructure, for such cases, gravity irrigation has efficiencies around 45% and pressurized plants are above 90%; converting irrigation systems by gravity to pressurized irrigation systems and improving irrigation by gravity are viable options for efficient use and sustainable water management. The latter can be achieved through land leveling, channel lining, replacement of channels by pipelines and design and proper management of parcel irrigation. Land leveling

aims to solve problems of low application efficiency and poor irrigation uniformity caused by topographic irregularities. With the use of traditional technology and / or laser technology it is possible to achieve leveling the agricultural land with high precision and this allows a water advance more evenly, vertically and horizontally, which achieves irrigation efficiencies up to 85%.

**Keywords:** shortage; demand; efficiency; irrigation by gravity

## 1. Introducción

En 1950, la población mundial ascendía a 2,529 millones de personas, mientras que para 2010, había aumentado a 6,909 millones. A partir de los últimos sesenta años, el crecimiento se concentró principalmente en las regiones en desarrollo, tendencia que se mantiene al 2050. Se estima que para 2050, la población mundial será de 9,150 millones (Undesa, 2008).

De los países del mundo con mayor población, México se encuentra en el undécimo lugar de un total de 222 con 122 millones de habitantes (55 hab/km<sup>2</sup>) hasta la fecha actual (UNS, 2008).

La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 millones de km<sup>3</sup>, de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5%, es decir 35 millones de km<sup>3</sup>, es agua dulce. De esta cantidad casi el 70% no está disponible para consumo humano debido a que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo. Es decir, menos del 1% del total se encuentra en lagos, ríos, humedad en el suelo y aire, humedales, plantas y animales (Clarke, *et al.*, 2004); (Conagua, 2011).

Anualmente México recibe aproximadamente 1'449.471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.2% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.3% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta los flujos de salida (exportaciones) y de entrada (importaciones) de agua con los países vecinos, el país cuenta anualmente con 446,777 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (Conagua, 2016b); (Conagua, *et al.*, 2012).

El principal uso del recurso hídrico a nivel

mundial, conforme a estimaciones de la FAO, es el agrícola, con el 72% de la extracción total. Entre estos países, los usos del agua en México se dividen con los siguientes porcentajes; 76.3% son para uso agrícola, 9.1% para uso industrial y 14.6% para uso de abastecimiento público. El riego es fundamental para la alimentación mundial (Conagua, 2016a).

De la superficie cultivada, sólo el 19% tiene infraestructura de riego, sin embargo, produce más de una tercera parte de los cultivos del mundo (FAO, 2010a). También es importante mencionar que en los últimos años la agricultura ha utilizado mayor cantidad de agroquímicos, que han derivado en la contaminación de suelos y acuíferos.

México ocupa el séptimo lugar mundial en términos de superficie con infraestructura de riego con 6.5 millones de hectáreas, de las cuales un poco más de la mitad corresponde a 86 distritos de riego, y el restante a más de 40 mil unidades de riego (Conagua, 2016a).

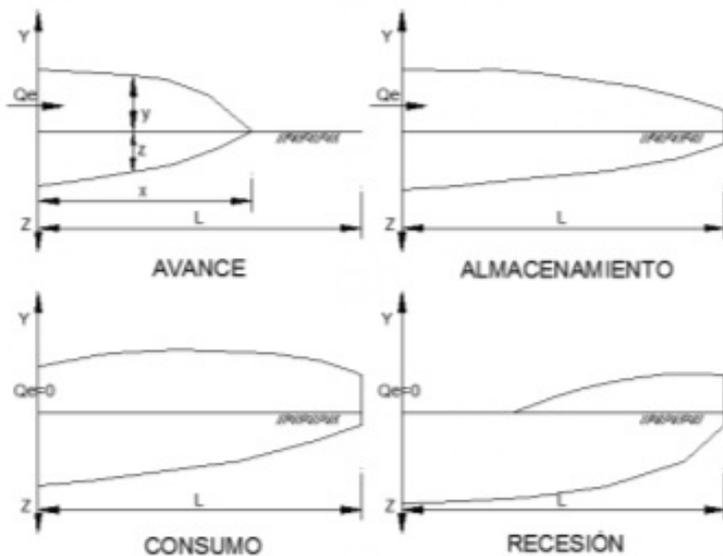
De los 6.5 millones de hectáreas que cuentan con infraestructura de riego, las eficiencias que se han llegado a alcanzar son arriba del 90% para el caso de riego presurizado mientras que en el riego por gravedad es alrededor del 45%, considerándose este como riego malo.

Si en una hectárea se riega con una lámina de diez centímetros, requeriría de 1,000 m<sup>3</sup> de agua. Sin embargo, si la eficiencia es de 45% esta cantidad subiría a 2,222.2 m<sup>3</sup> lo cual es una cantidad muy considerable. Si tan solo esta eficiencia de riego llegara a un 85%, la cantidad que se requiere para poder realizar el mismo riego sería de 1,176.5 m<sup>3</sup> y se estaría ahorrando casi la misma cantidad, lo cual se ocuparía para poder regar otra hectárea más. Este trabajo tiene la finalidad de demostrar que a través de la nivelación de los terrenos agrícolas se puede

lograr el uso eficiente del agua hasta un 85% de eficiencia de riego.

**2. Materiales y métodos**

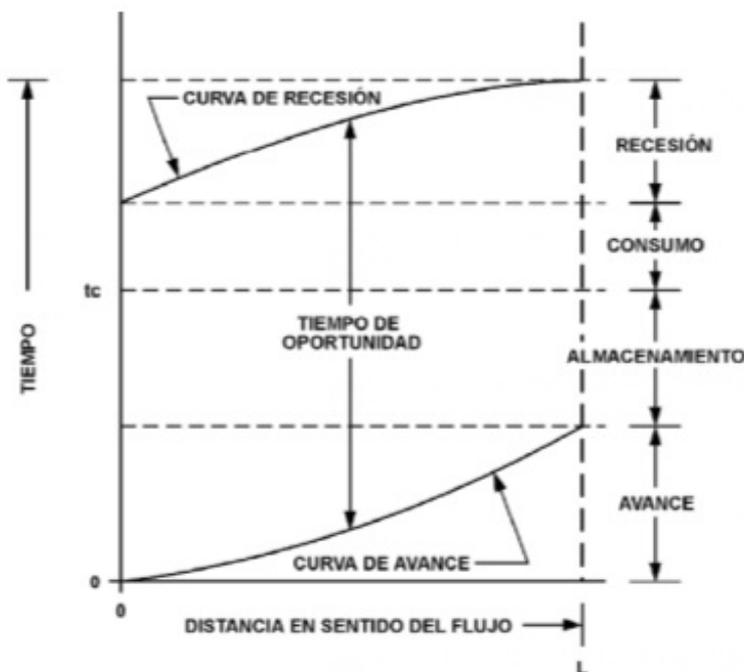
En el riego por gravedad se tienen diferentes procesos y fases, y éstas son: avance, almacenamiento, consumo y recesión (Figura 1).



**Figura 1.** Procesos y fases del riego superficial

Para poder evaluar un riego por gravedad es necesario medir los tiempos de avance ( $T_{av}$ ) y tiempos de recesión ( $T_{rec}$ ) en diferentes puntos en el surco o melga. Al graficar estos valores de tiempo en función de la longitud de la longitud del surco

se obtiene el tiempo de oportunidad de infiltración, por lo que con este dato y a través de la función de infiltración del agua en el suelo se puede obtener la lámina infiltrada (Figura 2).



**Figura 2.** Tiempo de oportunidad en el riego por gravedad

Si se tiene el tiempo de oportunidad, solo es cuestión de evaluarlo en el modelo de Kostiakov o alguna otra ecuación de infiltración (Ecuación 1).

$$Z = kt^a \tag{1}$$

Donde:

Z: es la lámina infiltrada acumulada (L<sup>3</sup>/L<sup>2</sup>).

t: el tiempo de oportunidad de minutos.

k y a son parámetros de la ecuación que se pueden

obtener por el método de los dos puntos

Se hizo una evaluación del riego por gravedad (riego de auxilio) en una parcela agrícola (sin nivelación), la cual tiene una textura franco arenosa.

Se tomaron las lecturas de tiempo de avance y de recesión del agua en un surco de 280 m de longitud, en diferentes distancias X, con gasto de entrada de 4 Lps, lámina de diseño de 5 cm y 90 cm de ancho del surco. Al final del surco se mantuvo cerrado para tener cero pérdidas por coleo (Tabla 1).

**Tabla 1.** Tiempos de avance y recesión en diferentes puntos del surco

x (m)	Tav (min)	Trec (m)
0.0	0.0	35.0
34.2	1.0	37.0
68.4	3.3	38.0
102.7	5.7	38.7
136.9	8.3	38.5
171.1	11.6	39.0
205.3	15.1	39.3
239.5	22.2	39.2
273.8	31.6	39.2
280.0	35.0	39.2

Utilizando el programa EVAGRAV, de la Universidad Autónoma Chapingo, se obtuvieron los parámetros del modelo de Kostiakov, k = 0.1915 y a = 0.8201. De ésta se obtuvo una eficiencia de aplicación de riego de 57%.

Debida a esta eficiencia, se procedió a realizar una nivelación de esta parcela agrícola.

### 2.1 Levantamiento altimétrico

El levantamiento altimétrico se basó al trabajo realizado por la CONAGUA (2003). Se llevó a cabo con equipo de estación total con aproximación angular de 5" y aproximación lineal de 3mm + 3 ppm.

**Tabla 2.** Datos de diseños

Coefficiente de compactación	0.200
Corte permisible (m)	0.300
Pendiente deseada en X (%)	0.00

Se levantaron suficientes triadas de valores X, Y, Z, en la parcela, para generar una malla deducida de cotas topográficas (plano topográfico) con equidistancia horizontal de 10 a 20 m.

#### 2.1.1 Proyecto de nivelación

El cálculo de las pendientes proyecto, las cotas proyecto, los espesores de corte y relleno y los volúmenes a mover, se llevó a cabo con el software SINIVET PLUS, de la Universidad Autónoma Chapingo. Este programa de cómputo utiliza el método de mínimos cuadrados para la obtención de la ecuación del plano proyecto, con lo que se obtiene el diseño de costo mínimo (Tabla 2).

Pendiente deseada en Y (%)	Natural_Y
<b>Resultados Obtenidos</b>	
Superficie a nivelar	0.5167 ha
Pendiente obligada en el eje X	0.00%
Pendiente natural en el eje Y	0.45096%
Costo unitario de movimiento	25.00 \$m <sup>3</sup>
Costo total de nivelación	\$2241.01
Area interior	0.3425 ha
Volumen de corte en área interior	59.417 m <sup>3</sup>
Volumen de relleno en área interior	48.979 m <sup>3</sup>
Relación Vol. Corte/Vol. Relleno	1.213
Altura de corte promedio	3.48 cm

El software SINIVET PLUS crea pequeños planos de referencia en donde se indican las zonas de cortes, relleno y las que no se van a mover, así como alturas de relleno y corte y los linderos de los terrenos. Lo más conveniente es llevar todos los datos a AutoCAD o algún otro programa para hacer planos de calidad.

Nivelado el terreno se procede a realizar un diseño del riego a aplicar.

### 2.2 Diseño de riego por gravedad

La longitud del surco es de 280 m; ancho de surco de 90 cm; la geometría, a una equidistancia horizontal de 10 cm, las profundidades son: 0, 7.0, 11.0, 6.5 y 0.0 cm. Se consideró cero pérdidas por coleo. Es necesario conocer las características del suelo (Tabla 3):

**Tabla 3.** Características del suelo franco arenosa del área en estudio.

Espesor, cm	$\omega_{sat},\%$	$\omega_{cc},\%$	$\omega_{pmp},\%$	Da (g/cm <sup>3</sup> )
0 - 30	31.1	18.8	9.9	1.4
30 - 60	31.4	17	9.1	1.4
60 - 90	26.3	25.1	12.7	1.4

Donde: 2 y 3).

Da= densidad aparente

Con base a las características del suelo (franco arenoso) presentados en la Tabla 2 y con el criterio para la aplicación de los riegos de auxilio (regar cuando se haya consumido el 70% de la humedad aprovechable), la lámina de diseño será de 0.0615 m.

El software RiGrav Versión 3.0, de la Universidad Autónoma Chapingo, requiere de los parámetros de infiltración de la ecuación de Green & Ampt. Esto con el fin de que no haya coleos al final del surco. Dicha ecuación se presenta a continuación (Ecuación

$$I = k_s t + \lambda \ln \left( 1 + \frac{I}{\lambda} \right) \tag{2}$$

$$\lambda = (h + h_f)(\theta_s - \theta_0) \tag{3}$$

Dónde:

I = infiltración acumulada [L], (cm).

K<sub>s</sub>=conductividad hidráulica a saturación [L/T], (cm h<sup>-1</sup>).

t = tiempo [T], (h).

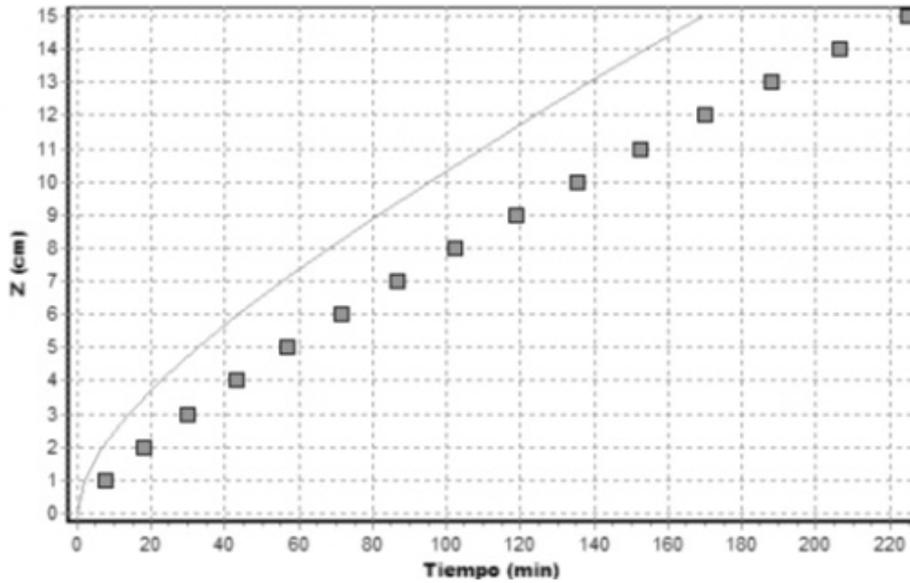
h= espesor de agua sobre la superficie del suelo [L], (cm).

$h_f$ = presión de succión en el frente de humedecimiento [L], (cm).

$\Theta_s$ = contenido de humedad a saturación [ $L^3/L^3$ ].

$\Theta_0$ = contenido de humedad inicial [ $L^3/L^3$ ].

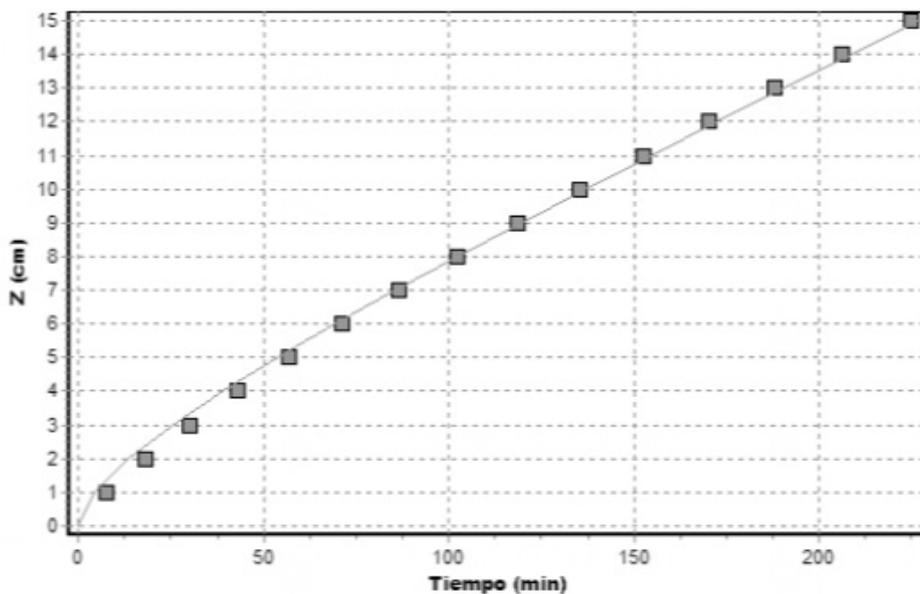
La calibración por infiltración se hace de acuerdo a la textura de suelo (franco arenoso) y con EVAGRAV se obtiene lo siguiente (Figura 3):



**Figura 3.** Curvas de infiltración no calibradas

La punteada es la que corresponde a los parámetros  $h_f$  y  $k_s$ . La curva (con línea continua) es la que corresponde a la función que arroja el programa.

Se empiezan a proponer valores de  $h_f$  y  $k_s$  para ajustar ambas funciones, obteniéndose así (Figura 4):



**Figura 4.** Función de infiltración calibrada

Con el programa RiGrav Versión 3.0, de la Universidad Autónoma Chapingo, se diseñó el riego.

De aquí se obtuvieron (Tabla 3):

**Tabla 3.** Diseño de riego

Parámetro	Unidad
Lámina de diseño	0.061 m
Lámina de riego bruta	0.085 m
Eficiencia de aplicación	0.876
Ea del requerimiento	0.973
CUC	98.3
Tiempo de riego	74.2 min
Gasto unitario	4.4 Lps

Se tiene una eficiencia de aplicación de riego de 87.6% y la eficiencia de aplicación del requerimiento es de 97.3%, por lo que se tiene un buen riego. Con

el mismo software se puede obtener el gasto óptimo con las eficiencias máximas y se obtiene (Tabla 4):

**Tabla 4.** Diseño de riego con gasto óptimo

Parámetro	Unidad
Lámina de diseño	0.0615 m
Lámina de riego bruta	0.0821 m
Eficiencia de aplicación	0.901
Ea del requerimiento	1.00
CUC	99
Tiempo de riego	81.6 min
Gasto unitario	4.0 Lps

Es necesario aplicar 4 Lps m<sup>-1</sup>, lo cual corresponde a 3.6 Lps (0.9 m de ancho) para el surco que se está trabajando, con lo cual se obtienen Ear = 100%, Ea = 90.1 y CC = 99. Por lo que se obtendrían buenos resultados en el riego.

### 2.3 Evaluación del riego por gravedad

De acuerdo al diseño anterior se realiza el riego y la evaluación del mismo. Tal como en el primer caso, se toman las medidas de tiempo de avance y recesión en los mismos valores de X (Tabla 1). Se cuidó que el agua no se perdiera por coleos. Con esto datos y con el programa EVAGRAV se realizó la evaluación. Los parámetros de la función de infiltración acumulada de acuerdo al suelo para el modelo de Kostiakov son: k = 0.198 y a = 0.798. Estos son obtenidos del programa utilizado.

### 3. Resultados y discusión

Los valores de eficiencias de riego fueron: eficiencia de aplicación de 85%, eficiencia de aplicación del requerimiento de 90.1% y coeficiente de uniformidad de Christiansen de 93. Estos valores, a comparación con lo diseñado en RiGrav, son excelentes resultados en un riego por gravedad ya que se pudo cubrir la demanda de agua a un 90.1% y con una uniformidad de 93, es decir, se ha aprovechado el agua de manera eficiente.

Los valores obtenidos en la evaluación (con datos obtenidos en campo) con el diseño (a través de EvaGrav) son muy parecidos y cabe mencionar que la función de infiltración se tuvo que calibrar (Figura 4) y esto ayudó a aproximar mejor el tiempo de riego. La nivelación del terreno agrícola y con ayuda del software se pudieron alcanzar dichos resultados con mayor facilidad.

#### 4. Conclusiones

Antes de nivelar el terreno agrícola, la eficiencia de riego estaba en un 57% y con la nivelación del mismo se elevó este valor a un 85%, lográndose un uso eficiente del agua a nivel parcelario. Los programas SINIVET PLUS, RiGrav y EvaGrav son herramientas de gran utilidad que va de la mano con la nivelación del terreno para lograr mejores resultados ya que éstos permiten simular y aproximar los resultados esperados en campo del riego por gravedad. Los valores de eficiencias que se obtienen de RiGrav no son los que se obtienen en campo. En este trabajo se demostró que los resultados del RiGrav con lo obtenido en campo no tienen diferencia significativa.

La nivelación de tierras pretende solucionar problemas de baja eficiencia de aplicación y deficiente uniformidad del riego ocasionados por irregularidades topográficas. Con el uso de la tecnología tradicional y/o tecnología laser se puede lograr nivelar el terreno agrícola con alta precisión y esto permite un avance del agua de manera más uniforme, vertical y horizontalmente, con lo cual se logran eficiencias de riego hasta un 85%.

#### 5. Referencias bibliográficas

Clarke. R, King. J., 2004. The Water Atlas.

CONAGUA., 2003. Proyecto para el diagnóstico y modernización del módulo temascalcingo del dr 033. Proyectos ejecutivos para nivelación de terrenos.

Conagua, 2011. Estadísticas del agua en México. Edición 2011. Capítulo 8, agua en el mundo.

Conagua, Semarnat., 2012. Atlas del Agua en México.

Conagua., 2016a. Estadísticas del agua en México. Edición 2016.

Conagua., 2016b. Subdirección General Técnica.

FAO., 2010a. Water and Food Security.

FAO., 2010b. Information System on Water and Agriculture, Aquastat. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=es>.

Para México: Conagua. Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola, (2010). <http://www.conagua.org>. Consultado el 2 de agosto de 2018.

Conagua, (2008). Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat World population Prospects, UNS. <http://esa.un.org/unpp>. Para México: Conagua. Subdirección General de Programación, (2010). <http://www.conagua.org>. Consultado el 2 de agosto de 2018.

Undesa. World Population Prospects, (2008). Medium fertility variant, 2010-2050. <http://esa.un.org/unpd/wpp2008/index>. Consultado el 1 de agosto de 2018.

La Revista Ingeniería y Región cuenta con la Licencia **Creative Commons** Atribución (BY), No Comercial (NC) y Compartir Igual (SA)

