

# NEKTA

División de Ingenierías

No. 8

año 5, No. 8, mayo-agosto 2019

# DIRECTORIO

## **Presidente de la Junta de Gobierno**

Mtro. Jaime Illescas López

## **Rectora**

Dra. María Hortensia Irma Lozano e Islas

## **Director de la División de Ingenierías**

Ing. Eduardo Torres García

## **Editoras Responsables**

Dra. María Hortensia Irma Lozano e Islas

Mtra. Irma Higinia Illescas Lozano

## **Coordinadora Editorial y de Publicaciones**

Dra. María de Jesús Espino Guevara

## **Diseño Editorial**

Mtra. Gabriela Arias Limón

NEXTIA, año 5, n.º 8, mayo-agosto de 2019, es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad del Valle de Puebla S.C., calle 3 sur # 5759, Col. El Cerrito, C. P. 72440, Puebla, Puebla, Tel. (222) 26-69-488. Editoras Responsables: Dra. María Hortensia Irma Lozano e Islas y Mtra. Irma Higinia Illescas Lozano. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2018-012418122300-203, ISSN: 2683-1988, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Coordinación Editorial y de Publicaciones, Dra. María de Jesús Espino Guevara, calle 3 sur # 5759, Col. El Cerrito. C. P. 72440, Puebla, Puebla, fecha de la última modificación, 09 de octubre de 2019.

El contenido de los artículos y las opiniones expresadas en los mismos son responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente reflejan las posturas de la Universidad del Valle de Puebla, de las Editoras Responsables o de la coordinación editorial.

Se prohíbe la reproducción total o parcial del contenido, fotografías, ilustraciones, colorimetría y textos publicados en este número sin la previa autorización que por escrito emita el editor.

# | ÍNDICE

Sistemas fotovoltaicos residenciales interconectados a la red <i>Saraín Flores Bautista</i>	5
Celdas solares y la tecnología del silicio <i>José de Jesús Martínez Basilio</i> <i>Claudia Antonio Hernández</i>	11
Entrenamiento a bajo costo de Redes Neuronales Artificiales mediante GPU y TPU, análisis exploratorio de hardware <i>Eduardo Berra Villaseñor</i> <i>Mónica Pérez Castañeda</i> <i>José Rodrigo Cuautle Parodi</i>	17
Los sistemas de información geográfica y el agua subterránea del estado de Puebla <i>José Erik Mendoza Mendoza</i>	26

# | EDITORIAL

La Agencia Internacional de Energía cree necesario una revolución de las energías limpias a fin de romper la dependencia de la economía mundial en las energías fósiles. Tal revolución debe promover la seguridad energética, el crecimiento económico y atender desafíos como los provenientes del cambio climático.

Las nuevas tecnologías deben conjuntar varios aspectos para hacer posible una transición energética exitosa: primero, una menor afectación al ambiente, esto pasa por el cambio en el uso de las fuentes de energía y una menor emisión de dióxido de carbono; segundo, una mayor eficiencia económica, esto con el propósito de lograr la ubicuidad en su uso y asegurar el mayor impacto positivo social.

En este sentido, la Universidad del Valle de Puebla (UVP), a través de la revista NEXTIA, recupera y difunde trabajos relacionados con el uso de la tecnología para generar energía limpia y mejorar los procesos industriales. Así, la UVP refrenda su compromiso por realizar análisis críticos de su entorno y buscar soluciones a problemas actuales y relevantes.

En primera instancia, sobre el tema de energías limpias, Saraín Flores Bautista en su artículo “Sistema Fotovoltaicos residenciales interconectados a la red” nos explica la eficiencia en la inversión de estos paneles solares en el hogar. Por otro lado, los autores José de Jesús Martínez Basilio y Claudia Antonio Hernández nos detallan el funcionamiento y panorama de las celdas solares basadas en silicio cristalino.

En segunda instancia, se aborda el tema de la inteligencia artificial y su implementación en los procesos industriales. Un artículo analiza los impactos de esta tecnología en cuanto a consumo energético y la optimización de costos. Los investigadores de la UVP, Eduardo Berra Villaseñor, Mónica Pérez Castañeda, José Rodrigo Cuautle Parodi, nos comparten parte de su investigación sobre el “Entrenamiento a bajo costo de Redes Neuronales Artificiales mediante GPU y TPU, análisis exploratorio de hardware”. Los autores miden el Impacto de la inteligencia artificial en los procesadores: su uso de energía y velocidad de procesamiento, así como concluyen en la factibilidad de su uso en cómputo móvil y robótica.

Finalmente, José Erik Mendoza Mendoza con su artículo “Los sistemas de información geográfica y el agua subterránea del estado de Puebla”, nos expone algunos de los problemas relacionados con la gestión del agua. Él propone el uso de tecnología digital para realizar un estudio y diagnóstico de las reservas hídricas del Estado de Puebla.

Mtro. Helder Osorio Moranchel,  
Coordinador de Investigación de la UVP.





# Sistemas fotovoltaicos residenciales interconectados a la red

Saraín Flores Bautista

## Introducción

Desde hace poco menos de 10 años, el uso de las energías renovables ha ido aumentando en México. La energía renovable que más se utiliza para uso residencial es la solar, y eso se puede observar fácilmente porque muchas casas tienen calentadores solares de agua para disminuir el consumo de gas. Algo que no sucede con los Sistemas Fotovoltaicos.

En este artículo se hablará de forma clara y con conceptos sencillos de electricidad, el panel solar fotovoltaico, los Sistemas Fotovoltaicos (SFV) interconectados a la red, funcionamiento del sistema y quiénes son clientes potenciales para instalarlos en sus hogares.

## Objetivo

De igual forma, el objetivo principal de este trabajo es informar al público en general sobre el funcionamiento de los Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la red. Este trabajo ayudará a mejorar la perspectiva relacionada a conveniente o no hacer la inversión.

## Desarrollo

Conceptos básicos de electricidad: Antes de iniciar, es necesario definir unos conceptos básicos de y sobre electricidad. La corriente eléctrica es el flujo de los electrones a través de un conductor. Es decir, los electrones se mueven por los cables para llegar a los aparatos eléctricos y hacerlos funcionar.

Existen dos tipos de corriente eléctrica, las cuales son la Corriente Directa (CD) y la Corriente Alterna (CA), las cuales podemos ver representadas en la Figura 1 y Figura 2:

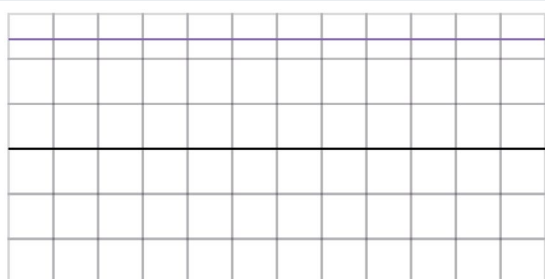


Figura 1. Corriente Directa.

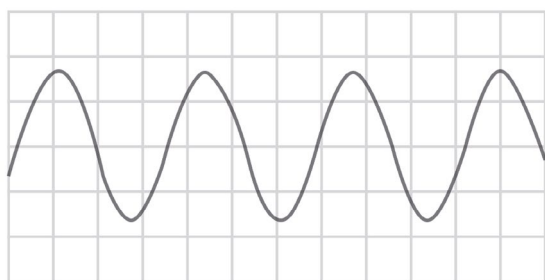


Figura 2. Corriente Alterna.

Por voltaje entendemos a aquello que hace que se muevan los electrones por el conductor. El Panel Solar Fotovoltaico (PSF) es un conjunto de celdas hechas a base de silicio, que pueden convertir la radiación solar a energía eléctrica. Dependiendo de la cantidad de celdas y la forma en que estas estén conectadas, nos van a dar un determinado voltaje y corriente eléctrica a la salida.

## Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Los Sistemas Fotovoltaicos los podemos clasificar en dos grupos:

- Sistemas Fotovoltaicos Aislados
- Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red.

Los Sistemas Fotovoltaicos Aislados son aquellos en los que la energía eléctrica es proporcionada por los paneles solares y se almacena en un banco de baterías para poder utilizarla. La cantidad de energía que sea almacenada se debe calcular de tal forma que tengamos algunos días de uso, por lo regular tres o cuatro de autonomía; esto quiere decir que en caso de que el día este nublado, la energía eléctrica del banco sea capaz de mantener funcionando los equipos eléctricos.

La aplicación de estos sistemas se da en lugares donde no existe red eléctrica. Este tipo de sistemas están formados por cuatro elementos principales, los cuales son 1) los Paneles solares fotovoltaicos, 2) el Controlador de carga, 3) las Baterías y, por último, 4) el Inversor de corriente (véase la Figura 3):

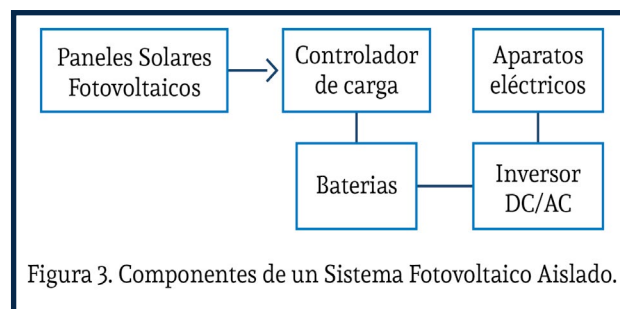


Figura 3. Componentes de un Sistema Fotovoltaico Aislado.

Los Sistemas Fotovoltaicos Interconectados son aquellos en los cuales, al igual que los aislados, la energía eléctrica es proporcionada por los paneles solares, pero

en lugar de almacenarla, se transmite a la red pública de la Comisión Federal de Electricidad.

La aplicación de estos sistemas se da en lugares donde existe una red eléctrica. Este tipo de sistemas está conformado por los siguientes elementos: 1) los Paneles solares fotovoltaicos, 2) el Inversor de corriente y 3) el Medidor de luz bidireccional (véase Figura 4):

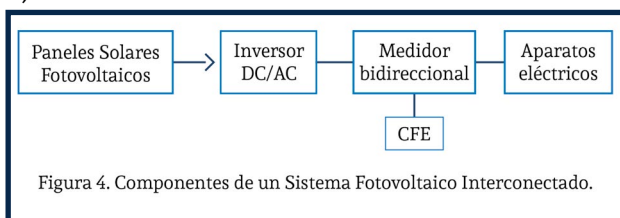


Figura 4. Componentes de un Sistema Fotovoltaico Interconectado.

Figura 4. Componentes de un Sistema Fotovoltaico Interconectado.

## Funcionamiento del SFV interconectado

**Paneles solares:** El tamaño del conjunto de paneles solares debe ser lo suficientemente grande para cubrir lo que demanda la casa (véase Figura 5).



Figura 5. Conjunto de paneles fotovoltaicos. Fuente: Comisión Federal de Electricidad (2019).

**Inversor de corriente:** El Inversor de corriente se emplea para convertir la Corriente Directa que generan los paneles solares a Corriente Alterna. Cabe mencionar que este dispositivo tiene que estar especialmente diseñado para interconectarse a la red pública ya que se deben sincronizar ambas señales, la que tiene a la salida el inversor con la que proporciona Comisión Federal de Electricidad (CFE) véase Figura 6.



Figura 6. Inversor de Corriente CD/CA para interconexión. Fuente: Fronius Primo (2019).

**Medidor de luz:** El medidor de luz sirve para medir la cantidad de corriente eléctrica consumida por el usuario. Mediante unas manecillas nos indica la cantidad de kWh que se utilizaron. Para los Sistemas Fotovoltaicos (SFV) es necesario el uso de un medidor bidireccional, ya que este va a medir la cantidad de corriente generada por los paneles solares y la compara con la energía consumida de la CFE, esta diferencia muestra si existe saldo a favor o en contra y se determina el pago que tiene que realizar el usuario (véase Figura 7).



Figura 7. Medidor de luz bidireccional.  
Fuente: MIAL Metering Systems (2019).

## ¿Quiénes son clientes potenciales?

Los ejemplos que se muestran en esta sección van dirigidos a los hogares ubicados en la ciudad de Puebla con tarifa 1 en el mes de junio de 2019. Cabe mencionar que las tarifas cambian cada mes, aunque la variación es mínima, es conveniente tenerlo en cuenta. Los montos calculados son sin el Impuesto al Valor Agregado (IVA).

Muchas personas han tenido la intención de adquirir un sistema fotovoltaico, pero es necesario saber que no es para todos. A continuación, la explicación: La energía eléctrica doméstica que proporciona CFE a la mayoría de los hogares tiene un subsidio hasta cierta cantidad de kWh consumidos, es decir, que el gobierno paga una parte de la luz que se utiliza, esto se puede ver en los recibos en el apartado que indicado como *aportación gubernamental*.

Si el consumo bimestral es menor a 500 kWh, se tiene derecho al subsidio antes mencionado y este es dado en tres niveles los cuales son: básico, intermedio y excedente. El costo de cada kWh en tarifa subsidiada es el siguiente:

Tabla 1.

Tipo de consumo	Apoyo	kWh
Básico	\$ 0.811	Primeros 150 kWh
Intermedio	\$ 0.980	Siguientes 130 kWh
Excedente	\$ 2.868	Cada kWh después de los anteriores

Nota: Niveles de subsidio en el consumo de energía eléctrica. Fuente: Comisión Federal de Electricidad (2019).

Caso 1: Según la información anterior, si el consumo bimestral es de 499 kWh, el usuario tendría que pagar:



Tabla 2.

Nivel	Costo por kWh	kWh	Pago
Básico	\$ 0.811	150	\$ 121.65
Intermedio	\$ 0.980	130	\$ 127.40
Excedente	\$ 2.868	219	\$ 628.09
TOTAL		499	\$ 877.14

Nota: Costo por kWh subsidiado. Fuente: Comisión Federal de Electricidad (2019).

Caso 2: Si el consumo es de 500 kWh, o más, al bimestre, el gobierno no brinda apoyo económico, esto es, retira la *aportación gubernamental*. En este caso, el usuario pasa a otra tarifa conocida como Doméstica de Alto Consumo (DAC). De acuerdo a la página oficial de la Comisión Federal de Electricidad, el costo de cada kWh en tarifa DAC es de \$4.921. Por lo tanto, al no existir el subsidio, se tiene que pagar cada kWh a ese precio y se puede observar en la tabla 3 la cantidad a pagar.

Tabla 3.

Nivel	Costo por kWh	kWh	Pago
Doméstica de Alto Consumo	\$ 4.921	500	\$ 2,460.50

Nota: Costo de kWh sin subsidio. Fuente: Comisión Nacional de Electricidad (2019).

Al comparar la Tabla 2 y la Tabla 3, se observa que la diferencia en consumo es de 1 kWh, lo que es prácticamente insignificante, pero por el cambio de tarifas, la diferencia en pesos entre los dos montos es considerable.

Por lo anterior, la instalación de un SFV interconectado a la red solamente le es atractivo a una persona que esté en tarifa DAC, ya que con el sistema generará suficiente energía eléctrica y se la entregará a CFE, y al hacer la diferencia entre lo consumido y lo generado, entrará a una tarifa con subsidio gubernamental.

En la Tabla 4 se muestran con detalle los dos casos anteriores, sin SFV y con un SFV de 400 kWh. En la Tabla se puede observar el beneficio monetario a largo plazo, ya que el precio de un Sistema Fotovoltaico que genere 400 kWh es de aproximadamente \$ 70,000.00.

Tabla 4.

Caso 1		Caso 2	
Sin SFV 499 kWh	\$ 877.14	Sin SFV 500 kWh	\$ 2,460.50
Con SFV 99 kWh	\$ 80.29	Con SFV 100 kWh	\$ 81.10
Ahorro bimestral	\$796.85	Ahorro bimestral	\$ 2,379.40
Ahorro anual	\$ 4,781.10	Ahorro anual	\$ 14,276.40
Ahorro en 5 años	\$ 23,905.50	Ahorro en 5 años	\$ 71,382.00

Nota: Demostración de ahorro entre consumidores con/sin un Sistema Fotovoltaico (STV) instalado.

## Conclusiones

Si comparamos los dos casos analizados, se observa que al consumidor que cuenta con el subsidio por parte del gobierno no le es redituable adquirir un SFV ya que tardaría en recuperar su inversión alrededor de 15 años.

Por otro lado, el que está en tarifa DAC, al instalar el SFV pasa a la tarifa con subsidio gubernamental y vería el beneficio de la inversión desde el primer bimestre. Haciendo la proyección a 5 años, ya habrá recuperado la inversión. De lo anterior se concluye que los Sistemas Fotovoltaicos Domésticos Interconectados a la red solamente son atractivos para un porcentaje pequeño de la población en general.

## Referencias Bibliográficas

Comisión Federal de Electricidad. (2019). Recuperado de: <http://www.cfe.gob.mx>

Fronius Primo (2019) *Generación de potencia que dura* [Página de internet]. Recuperado de: [https://www.fronius.com/es-mx/mexico/energia-solar/productos/todos-los-productos/inversor/fronius-primo/9650http://www.conymed.com/producto\\_CP-16-12S.html](https://www.fronius.com/es-mx/mexico/energia-solar/productos/todos-los-productos/inversor/fronius-primo/9650http://www.conymed.com/producto_CP-16-12S.html)

MIAL Metering Systems (2019). Medidor electrónico bifásico de energía eléctrica [Página de internet]. Recuperado de: [http://www.conymed.com/producto\\_CP-16-12S.html](http://www.conymed.com/producto_CP-16-12S.html)

Next arquitectura (2008, 12 de noviembre). Paneles fotovoltaicos o paneles térmicos solares [Blog digital]. Recuperado de: <https://www.nextarquitectura.com/arquitectura/paneles-fotovoltaicos-o-paneles-termicos-solares/>

# Celdas solares y la tecnología del silicio

José de Jesús Martínez Basilio  
Claudia Antonio Hernández



## Introducción

Actualmente se buscan nuevas alternativas para generar energías libres de contaminantes que afecten lo menos posible al medio ambiente. En esta búsqueda se encuentra el desarrollo de las celdas solares basadas en silicio cristalino, donde su principio de funcionamiento se encuentra en la conversión de energía tomando como fuente la radiación solar. La importancia y sus principales características de funcionamiento se muestran en este trabajo.

Hoy en día, las dificultades que existen para satisfacer la demanda de energía por medio del uso de combustibles basados en carbón, petróleo y gas han crecido de manera dramática. El consumo que actualmente requieren las grandes urbes puede provocar que las tendencias de este tipo de combustibles se acaben en un futuro no muy lejano. Por otra parte, y debido a al impacto ambiental generado día con día

al planeta, se ha generado un panorama de crisis energético a nivel mundial. Por lo que la búsqueda de energías alternas que puedan sustituir a las fuentes tradicionales actualmente se han convertido en un tema de interés.

Bajo esta tendencia, en las últimas décadas se ha encontrado en las denominadas energías verdes (también conocidas como renovables) una opción viable y prometedora para sustituir a los combustibles fósiles. Teniendo como principal ventaja, no generar daño ecológico a nuestro planeta, además de presentarse en la naturaleza de forma inagotable. Energías como eólica, hidráulica, biomasa y solar son ejemplos de energías que actualmente están siendo aplicadas en gran parte del mundo como una alternativa sustentable. De todas ellas, la solar posee mayor expectativa debido a que puede ser ampliamente aprovechada mediante el uso de dispositivos fotovoltaicos, donde la celda solar es el principal componente.

## La radiación solar

El sol es la estrella más cercana a la Tierra y es el responsable de la vida en nuestro planeta. La Tierra recibe de manera continua la radiación solar como resultado del proceso de fusión nuclear que tiene lugar en el Sol. A lo largo de la historia, el hombre y los demás seres vivos han utilizado esta energía limpia y gratuita como fuente de vida. La irradiancia solar total que llega al exterior de la atmosfera de la Tierra tiene un valor aproximado de  $1,365\text{W/m}^2$  y es conocida como *constante solar*. En términos de distribución espectral, es referida como *MASA DE AIRE CERO* (AM0 por sus siglas en inglés).

Donde el término Masa de Aire (AM) se define como la medición de absorción que se lleva a cabo en la atmosfera (Luque y Hegedus, 2011).

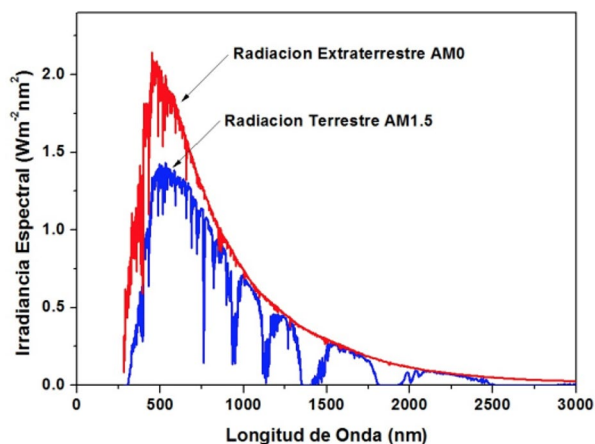


Figura 1. Distribución espectral de la intensidad de radiación. Fuente: Solar Spectra (s.f.).

Cabe mencionar que no toda la radiación alcanza la superficie terrestre, ya que al pasar a través de la atmosfera, varias porciones del espectro solar son reflejadas o absorbidas, principalmente por moléculas de agua, carbono y oxígeno (Goetzberger, Knobloch y Voss, 1998) causando una disminución de la irradiancia hasta un valor promedio de  $1000\text{ W/m}^2$ , valor conocido como espectro AM1.5 (véase Figura 1). El espectro AM1.5, actualmente se ha definido como condiciones de prueba estándar (Standard Test Condition, STC) utilizado por la industria fotovoltaica para la caracterización de las celdas solares.

## Estatus actual de las celdas solares

En lo concerniente a la fabricación de celdas solares, actualmente existe un enorme progreso tecnológico a nivel mundial donde se han desarrollado e innovado diversos procesos de fabricación de dispositivos fotovoltaicos a través del uso de distintos materiales, con el objetivo de aprovechar al máximo la radiación solar y de esta manera lograr las mayores eficiencias de conversión posibles. Actualmente las tecnologías de celdas solares se dividen en tres grandes generaciones (Gangopadhyay, Sukjendu & Das, 2013; Askari, Mirzaei & Mirhabibi, 2015).

- Primera generación: Este tipo de solares basan su funcionamiento en la unión-pn y comúnmente son fabricadas sobre obleas de silicio, ya sea cristalino (c-Si) o poli-cristalino (poly-Si).



- Segunda generación: Están basadas en la tecnología de película delgada (Thin Film) y se subdivide en tres grupos: 1) Silicio amorfo (a-Si); 2) Telurio de Cadmio (CdTe); 3) Cobre, Indio, Galio y Selenio (CIGS) así como Cobre, Indio y Selenio (CIS).
- Tercera generación: Se caracterizan por utilizar en su fabricación materiales orgánicos que sustituyen a los semiconductores. Este tipo de celdas orgánicas están en desarrollo por lo que no han sido ampliamente comercializadas.

A pesar de las diversas tecnologías que existen para el desarrollo y fabricación de celdas solares, es la tecnología del silicio (policristalino y monocristalino) es la que actualmente domina el mercado fotovoltaico abarcando más del 80% de la producción mundial (Goetzberger y Hoffmann, 2005). El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y debido a que presenta diversas ventajas sobre el resto de las tecnologías, los paneles solares basados en esta tecnología duran más de 20 años y la tecnología del silicio ha sido ampliamente estudiada por la industria semiconductor. Por tal motivo se espera que dicha tecnología siga dominando el mercado fotovoltaico.

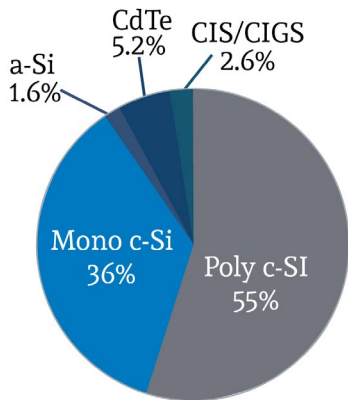


Figura 2. Diferentes tecnologías para el desarrollo de Celdas Solares. Fuente: (Goetzberger y Hoffmann, 2005).

## Celda solar de Silicio

Las celdas solares son dispositivos que tienen la capacidad de transformar la radiación incidente del Sol en corriente eléctrica, por medio del efecto fotovoltaico (Blakersa, Zina, McIntosh y Fonga, (2013). El efecto fotovoltaico consiste básicamente en la separación de los portadores de carga huecos ( $h^+$ ) y electrones ( $e^-$ ) Estos se excitan dentro de la celda solar una vez que esta es iluminada. Posteriormente, son colectados por los contactos metálicos y producen una corriente eléctrica (véase Figura 3).

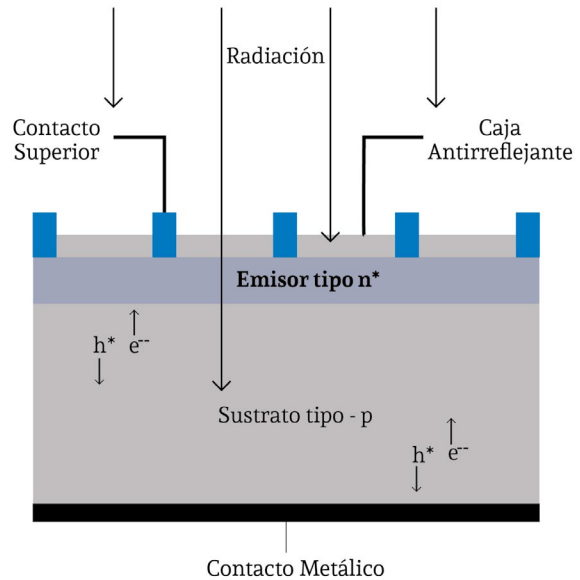


Figura 3. Esquema de una celda solar básica. Creación de pares electrón-hueco  $e^-$  y  $h^+$ .

Las celdas solares basadas en la tecnología del silicio cristalino (c-Si) consisten básicamente en un material semiconductor tipo-p denominado base, y otro tipo-p llamado emisor; para formar una unión  $pn$  en donde en la interfaz de dicha unión se

lleva a cabo la separación de los portadores de carga. También emplean una capa delgada como película antirreflejante para disminuir las pérdidas por reflexión, siendo el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y el nitruro de silicio ( $\text{SiN}^x$ ) los materiales comúnmente utilizados para la fabricación de dichas capas (Ali, Khan & Mat, 2014).

Finalmente, se tienen los contactos metálicos para extraer los portadores de carga, sacarlos de la celda solar y producir, de esta forma, la fotocorriente. Es importante resaltar que la rejilla para formar los contactos metálicos superiores se deben diseñar de tal manera que no ocupen mucho espacio en la superficie como se observa en la Figura 4. De lo contrario, aumentaría el área de sombreado en las celdas solares, lo cual se traduciría en menor captación de la radiación solar.

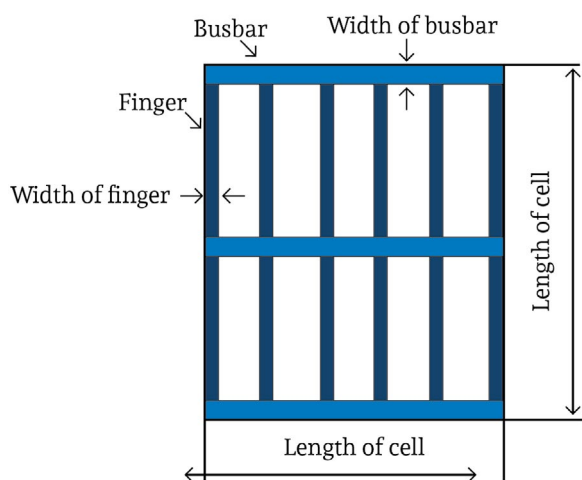


Figura 4. Diseño de la rejilla para la formación del contacto superior. Fuente: Lee & Rao (2016).

## Principios de funcionamiento

Cuando la radiación solar incide sobre la superficie de las celdas, los fotones o haces de luz, con energía suficiente podrán ser absorbidos por el material semiconductor y podrán liberar un electrón. Por cada electrón liberado se generará un hueco en su lugar proporcional. Es importante mencionar que después de cierto tiempo, la energía ganada por estos portadores se pierde poco a poco, haciendo que estos vuelvan a un estado de reposo. Los electrones y huecos que alcancen la interfaz (juntura) de la unión *pn* podrán ser separados por un campo eléctrico creado en dicha interfaz, y de esta manera, llegar a los contactos metálicos para dar origen a una foto-corriente como se muestra en la Figura 5.

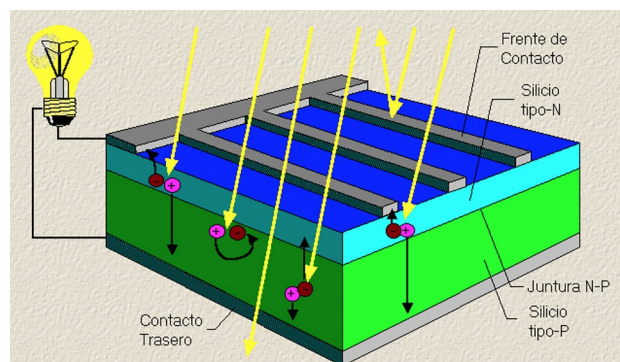


Figura 5. Esquema de Funcionamiento de una Celda solar de silicio. Fuente: Universidad de Chile (s.f.).

## Parámetros de desempeño:

De manera ideal, una celda solar puede ser representada por una fuente de corriente conectada en paralelo con un diodo, una

resistencia en paralelo y una en serie, como se muestra en el circuito equivalente de la Figura 6. La fuente de corriente emula a la radiación solar, el diodo representa al corazón de la celda solar y las resistencias parásitas (serie y paralelo) representan las pérdidas que presentan las celdas solares reales.

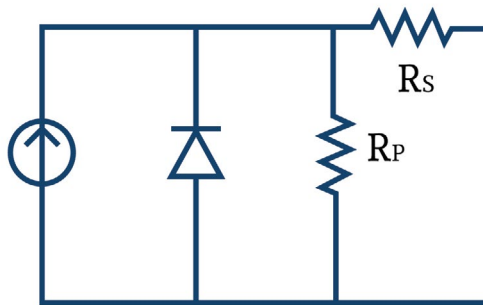


Figura 6. Circuito equivalente de una celda solar.  
Fuente: Goetzberger y V.U. Hoffmann (2005).

En la Figura 7 se muestran las curvas características corriente-voltaje (I-V) de una celda solar ideal (Goetzberger y V. U. Hoffmann, 2005). La primera curva corresponde al diodo y es la medición de la celda solar en oscuridad, es decir, sin la fuente de corriente. Mientras que la segunda pertenece a la celda solar bajo iluminación, bajo condiciones de prueba AM1.5. De forma gráfica, la corriente de corto circuito (Isc), que es la corriente máxima producida por una celda solar cuando sus terminales están cortocircuitadas y se obtiene cuando el voltaje es cero.

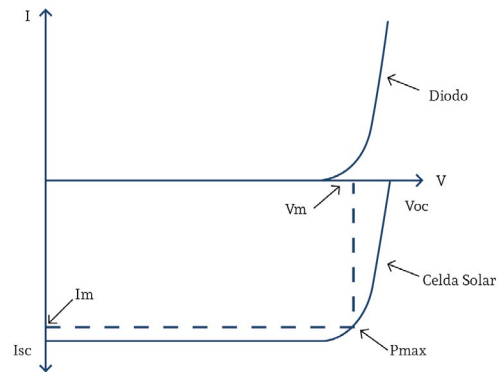


Figura 7. Curvas I-V características de una celda solar ideal.

Por otra parte, el voltaje de circuito abierto (Voc) es el voltaje máximo que puede tener la celda cuando sus terminales están abiertas. Lo anterior está dado por el punto en el cual la curva característica I-V de la celda solar bajo iluminación corta el eje de V, es decir, cuando Isc vale cero.

Otro parámetro importante es el Factor de Llenado (FF por sus siglas en inglés). De manera gráfica, se obtiene a partir del rectángulo formado por los puntos del voltaje máximo (Vmax), la corriente máxima (Imax) y la potencia máxima (Pmax).

Finalmente, la eficiencia ( $\eta$ ) de una celda solar se define como la razón de la potencia máxima de salida del dispositivo entre la potencia de la luz incidente y se puede expresar de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{I_{max} V_{max}}{P_{max}} = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{P_{max}}$$

Los valores de los parámetros en la celda solar de c-Si de alta eficiencia (PERL) son: Voc de 700 mV, Isc de 40 mA/cm<sup>2</sup> y FF de 80% Eff 25% (Green, et al., 2015).

## Conclusión

Actualmente, el mercado fotovoltaico es dominado por la tecnología del silicio por sus diversas ventajas sobre el resto de las demás. A pesar de que se ha logrado eficiencia record del 25%, eso ha sido a nivel laboratorio ya que a nivel industrial la eficiencia oscila en un 20%. Por tal motivo, se espera que se busquen nuevas alternativas en la fabricación para aumentar la eficiencia disminuyendo costos.

## Referencias bibliográficas:

- Ali, K., Khan, S. A. & Mat Jafri, M. Z. (2014). Effect of double layer (SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>) antireflective coating on silicon solar cells. *International Journal of Electrochemical Science*, 9(3), 1-10.
- Askari, M., Mirzaei Mahmoud Abadi, V. & Mirhabibi, M. (2015). Types of Solar Cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics*. 3(5), 94-113. DOI: 10.11648/j.ajop.20150305.17
- Blakersa, A., Zina, N., McIntosh K. R. & Fonga, K. (2013). High Efficiency. *Energy Procedia*, 33(1), 1-10.
- Gangopadhyay, U., Sukjendu, J. & Das, S. (2013). State of art of solar photovoltaic technology. *Journal of Energy*, 1-9, DOI: 10.1155/2013/764132
- Goetzberger A. & Hoffmann, V. U. (2005). *Photovoltaic solar energy generation*. United States of America: Springer Science.
- Goetzberger, A., Knobloch, J. & B. Voss. (1998). *Crystalline silicon solar cells*. United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. & Dunlop, E. D. (2015). Solar cell efficiency tables (version 47). *Progress in photovoltaics: research and applications*, 24(3), 1-9, DOI: 10.1002/pip.2728
- Lee, H.-G. & Rao, S. S. (2016). Optimization of the Geometric Design of Silicon Solar Cells under Concentrated Sunlight. *American Journal of Mechanical Engineering*, 4(2), 50-59. DOI: 10.12691/ajme-4-2-2
- Luque, A. & Hegedus, S. (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. United Kindom: John Wiley & Sons.
- Solar Spectra (s.f.). NREL Transforming Energy. Recuperado de: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5>
- Universidad de Chile, Ciencias de la Computación (s.f.) *Celda Fotovoltaicas*. Recuperado de: <https://users.dcc.uchile.cl/~roseguel/celdasolar.html>



# Entrenamiento a bajo costo de Redes Neuronales Artificiales mediante GPU y TPU, análisis exploratorio de hardware

Eduardo Berra Villaseñor  
Mónica Pérez Castañeda  
José Rodrigo Cuautle Parodi

## Introducción

El desarrollo de la Inteligencia Artificial (IA) es un hito que marca un cambio de paradigma significativo en los procesos de creación de algoritmos para *deep learning* (aprendizaje profundo) (Basogain, 2005). La parte esencial de este proceso radica en entrenar redes neuronales artificiales, donde el reconocimiento de imágenes y objetos en tiempo real es necesario para que la toma de decisiones quede a cargo de la máquina. De igual manera, el hardware utilizado para el procesamiento de estos algoritmos tiene una alta exigencia de rapidez de procesamiento, el cual ha tenido una evolución en las capacidades y costos, tal es el caso de las tarjetas GPU (Graphics Processing Unit) de las marcas Ati y Nvidia.

En el presente trabajo se realiza un análisis exploratorio de las tendencias sobre el hardware utilizado para entrenamiento de redes neuronales artificiales, enfocadas a *deep learning*, obteniendo una comparación entre estas opciones que permitirán tomar una decisión entre las herramientas disponibles en el mercado, con la finalidad de experimentar sobre redes neuronales artificiales a bajo costo y con las tecnologías más apropiadas para su uso.

## Metodología

Se analizarán tres tecnologías de las principales marcas de hardware que pueden ser utilizadas para ser enfocadas a entrenamiento de redes neuronales artificiales a bajo costo y dos especializadas

en aceleración de entrenamiento para redes neuronales artificiales, tres GPU y dos TPU (Tensor Processing Unit), tomando en cuenta los siguientes factores: El desempeño del hardware en procesos paralelos, arquitectura de procesamiento, capacidad de cálculos de procesamiento y costo.

Las pruebas de rendimiento serán tomadas de diversas fuentes involucradas en el análisis de rendimiento de procesadores GPU, de igual forma, la TPU NVIDIA Jetson Nano, tecnologías utilizadas por su alto desempeño en el procesamiento de información en paralelo, haciendo notar que la tecnología de Movidius será testeada con un algoritmo similar a los ejecutados en las GPU ya que se cuenta con una unidad para pruebas. Por último, se mostrará una tabla comparativa de las cinco tecnologías y su desempeño.

## Objetivos

Desarrollar un estudio comparativo sobre tarjetas GPU y TPU, así como recabar las características tomadas del datasheet del fabricante del hardware que se encuentran en el mercado para entrenamiento de redes neuronales artificiales.

Mediante las gráficas correspondientes a dos variables de desempeño (Velocidad de entrenamiento muestras por segundo

y Gflops reales por segundo), se realizará una tabla comparativa entre las mismas tecnologías.

Definir los requerimientos mínimos para realizar deep learning entrenando redes neuronales artificiales con hardware a bajo costo.

## Planteamientos

La tecnología y los sistemas que hoy en día se desarrollan distan, por mucho, con respecto a la programación que se realizaba antaño. El cambio de paradigma se está dando desde el año 2000 en forma acelerada, con la democratización de la IA y el deep learning; el software que se requiere desarrollar con lleva la toma de decisiones y el entendimiento del mundo, esto no solo como un objeto, más bien, como *un todo* sobre el cual hay que accionar.

El denominado deep learning es un campo de Inteligencia Artificial (IA) que permite que las computadoras aprendan con experiencia y entiendan el mundo en términos de jerarquía de conceptos, con cada concepto definido por su relación con conceptos más simples (Florencio, et al., 2019). Sin embargo, las redes neuronales artificiales, algoritmos bases para la IA, tienen la dificultad de requerir un proceso de entrenamiento tardado y que generalmente exige muchos recursos de procesamiento que, a su vez,

consumen tiempo en demasía (Guo, et al., 2019).

El entrenamiento de las redes neuronales es un proceso que puede variar dependiendo del problema tratado, dichos problemas pueden ir desde la identificación y clasificación de objetos hasta la detección de enfermedades analizando síntomas y padecimientos. Básicamente el desarrollo de una red neuronal artificial estándar consta de los siguientes puntos:

1. Diseño de un modelo de red neuronal artificial que puede caer en los siguientes tipos:

a) Perceptron Simple, b) Red de Hopfield, c) Perceptrón Multicapa, d) Competitiva Simple, e) Online ART1, f) competitivas ART2 y g) Autoorganizadas-*Mapas de Kohonen*.

2. Entrenamiento de la red neuronal artificial el cual consta de las siguientes etapas:

- Recabar la base que la red neuronal artificial analizará.
- Definir los parámetros sobre los que la red neuronal artificial accionará: imágenes, videos o información (por ejemplo, para identificar peces mediante imágenes las cuales son representativas de la especie).
- Ejecutar un conjunto de iteraciones con los datos, alimentando al software que clasificará o actuará basado en el modelo establecido previamente.
- Por último, maximizar las interacciones para obtener un modelo más refinado.

Este consumo exagerado que provoca el procesamiento de las interacciones de entrenamiento de la red neuronal artificial, ha llevado a la utilización de hardware que permita acelerar las iteraciones matemáticas, e incluso, a usar hardware previamente desarrollado para otros

propósitos de aceleración. Un ejemplo de uso para aceleración de cálculos matemáticos son las GPU que se utilizan para acelerar las ordenes de tratamiento de video que requieren muchos cálculos matemáticos (Kayid, 2018). Para obtener modelos más rápidos y precisos se exige una agilidad en el entrenamiento de los mismos, por lo que el hardware que no fue pensado para entrenar y generar redes neuronales artificiales, puede acelerar los procesos computacionales debido a su arquitectura, estos a su vez se tornan como una opción más de procesamiento ágil.

En contraparte, existen los procesadores TPU pensados específicamente para generar y maximizar el procesamiento requerido por las interacciones, tal es el caso de procesadores como Movidius, que se especializa en el entrenamiento de las redes neuronales artificiales, permitiendo una amplia gama de aplicaciones, desde la navegación interior basada en cámara de video hasta el escaneo 3D (Moloney, et al., 2014). En la Figura 1 se muestra físicamente una GPU y una TPU.

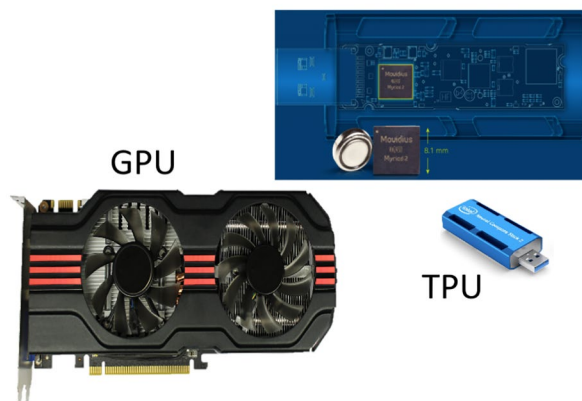


Figura 1: Intel® Movidius™ Myriad™. Ilustración Neuronal Stick 2, GPU ATI. Recuperado de <https://www.movidius.com/myriad2>

## Resultados

Se seleccionaron tres tarjetas gráficas de los siguientes modelos GeForce GTX 1070, AMD Radeon RX 580, HD Graphics 4400. Todas las tarjetas GPU tienen una capacidad de 8Gb de RAM gddr5. En cuanto a los TPU se seleccionaron las siguientes Movidius neuronalstick 2 de Intel y NVIDIA Jetson Nano basados en el costo similar a las de las GPU.

Según las características del fabricante, se obtuvieron los siguientes datos, para cada modelo de GPU como se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1.

Modelo	GeForce GTX 1070	Radeon RX 580	Graphics 4400
Memoria Gddr5	8 Gb	8Gb	6,8 Gb
Procesador	GP104	AMD 580	Haswell GT2
Nanómetros de fabricación	16 nm	28 nm	22 nm
Consumo de energía	150 W	60 W	20 W
Punto Flotante	6,738 Gflops	1,389 Gflops	4,6 Gflops
Número de los transistores	7,200 Millones	1,870 millones	392 millones
Bus	PCIe 3.0	PCIe 3.0	PCIe 3.0
Precio	US\$389.00	US\$401.89	US\$425.32

Datos obtenidos de datasheet de cada proveedor. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, la GPU Intel HD Graphics 4400 puede tener una variante de memoria de 6Gb, para este estudio las características y datos de rendimiento se tomaron con la variante de 8Gb.

Las GPU son contempladas bajo el nivel de tecnología y precios adecuados al costo de equipos de cómputo convencionales, ya que existen versiones de gama ultra alta que superan el 300% en costo, más no existe una diferencia significativa en cuanto al procesamiento de entrenamiento para redes neuronales artificiales. La Figura 2 muestra físicamente estos equipos.



Figura 2. GPUs seleccionadas. Fuente: NCG proveedores.



En su artículo de test sobre entrenamiento de redes neuronales artificiales, Moloti Nakampe utiliza un modelo GroceryNet, que es un modelo CaffeNet, una red neuronal artificial más refinada para realizar las pruebas sobre GPUs la cual es una réplica de AlexNet. CaffeNet tiene una ligera ventaja computacional para AlexNet en el procesamiento (Nakampe, 2018), los resultados obtenidos en las GPUs en el entrenamiento de esta red neuronal artificial son los siguientes:

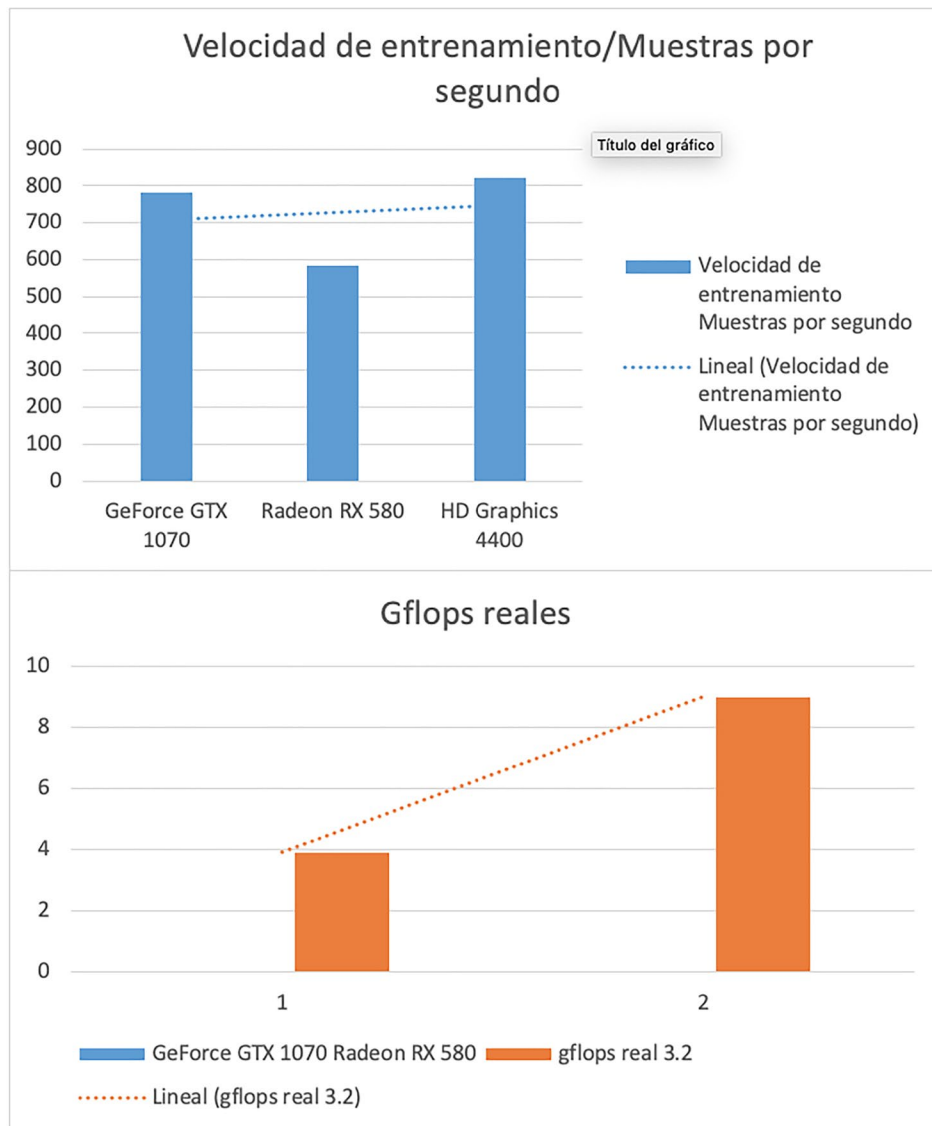


Figura 3. Resultados de prueba a GPUs datos de modelo GroceryNet. Fuente: Elaboración propia con datos de Nakampe, M. (2018). *GroceryNet at the Edge using Intel Movidius Neural Compute Stick*.

En el caso de las TPUs según las características del fabricante se obtuvieron los siguientes datos los cuales se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2.

Modelo	Intel Neutronal Stick 2 Movidius	NVIDIA Jetson Nano
Memoria LPDDR3	4 Gb	4Gb
Procesador	Movidius 2485	NVIDIA Maxwell
Nanómetros de fabricación	28 nm	14 nm
Consumo de energía	0.9 W	5 W
Punto Flotante	100 Gflops	72 Gflops
Número de los transistores	8.50 Billones de Transistores	9 Billones de Transistores
Bus	USB 3.0	-----
Precio	US\$100	US\$299

Datos obtenidos de datasheet de cada proveedor. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, el consumo en Watts es inferior a los GPU, en el caso del chip Movidius claramente se aprecia el bajo consumo de menos de 1W. Además, el subsistema de memoria controlada por software permite el control detallado de diferentes cargas de trabajo si fuese necesario (Rivas-Gomez, Pena, Moloney, Laure, & Markidis, 2018). La Figura 4 muestra visualmente las TPU analizadas.

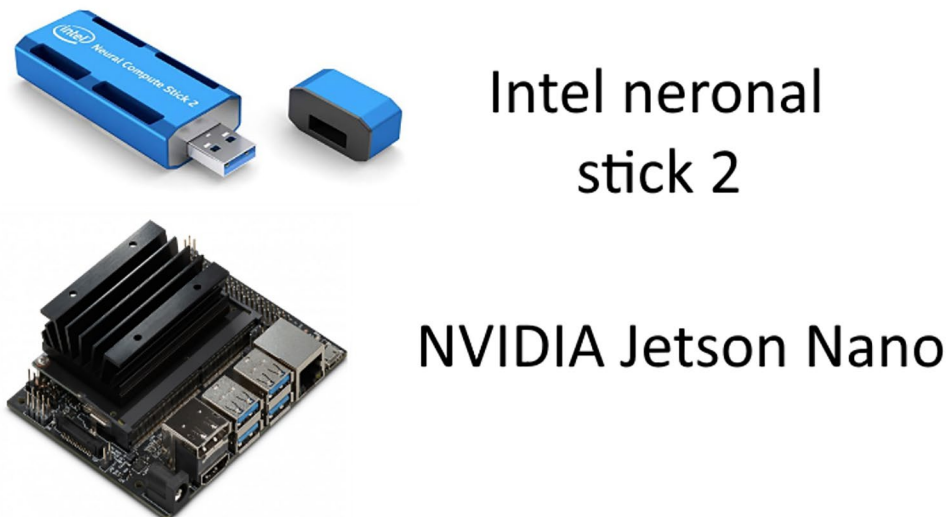


Figura 4. TPUs seleccionadas. Fuente: proveedores Intel-Nvidia.

Los resultados que arrojan la prueba de entrenamiento en TPU aplicados mediante el modelo de red neuronal artificial GroceryNet utilizadas de igual forma en las GPU fueron los siguientes (véase Figura 5):

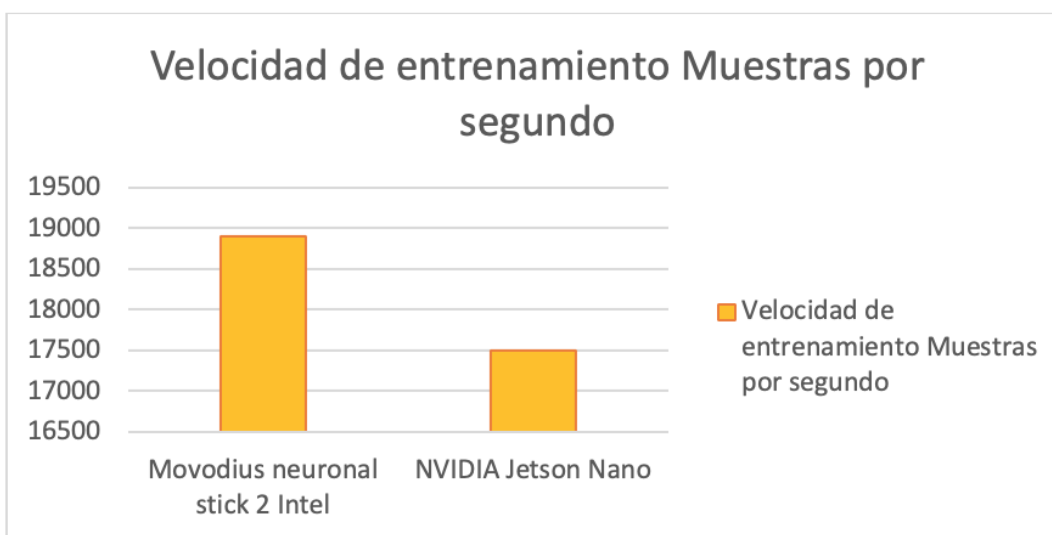
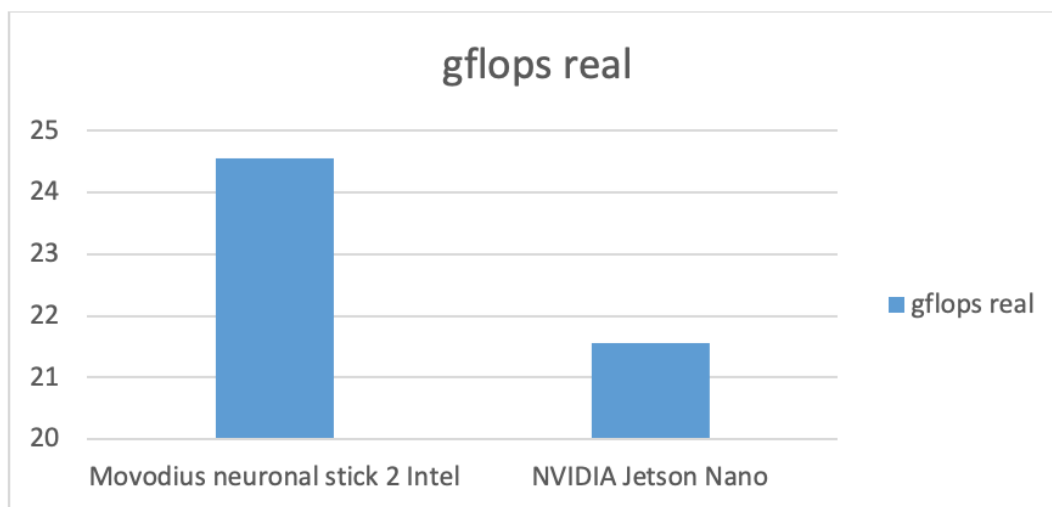


Figura 5. Resultados de pruebas a TPUs datos de modelo GroceryNet (Nakampe, 2018) y propias para Intel Movodius Neuronal Stick 2.

La velocidad de entrenamiento es notablemente mayor a menor consumo de energía, sin embargo, la capacidad de almacenamiento del modelo de la red neuronal desarrollada está limitada por la memoria interna de almacenamiento a no más de 4Gb, por lo que se tendrían que agregar módulos extras en redes neuronales artificiales de mayor tamaño, esto no es una limitante, ya que esta opción tiene como ventaja su bajo costo (cien dólares).

El deep learning, como se ha mencionado, es una técnica exigente con la aceleración de los procesos matemáticos en los equipos de computo involucrados en su desarrollo, basados

en las mediciones de una red considerada de nivel intermedio como la GroceryNet. Observando las velocidades de muestreo por segundo entre GPU y TPU podemos definir que, si se desea un entrenamiento adecuado en tiempo y a bajos costos, el mínimo requerimiento de hardware sería el siguiente:

Optando por un GPU: GPU con procesador GTX 1070 o superior 8Gb recomendado para procesamientos multicapa de red neuronal artificial debido a la capacidad de memoria disponible.

Optando por un TPU: TPU Movidas Neuronal Stick 2 el mejor rendimiento por su bajo consumo de energía en procesamiento monocapa por su capacidad de 4Gb.

## Conclusiones

La aparición de la Inteligencia Artificial plantea un gran reto para los procesadores convencionales, el consumo de energía y la velocidad de procesamiento son las principales carencias que tienen los desarrolladores que pretenden incursionar en el mundo del deep learning y el entrenamiento de las redes neuronales.

El presente artículo pretende ser una guía comparativa entre las principales opciones para incursionar al desarrollo de IA a bajo costo y con las mejores opciones del mercado.

Se realizó la comparación entre los tres modelos GPU que pueden proporcionar un rendimiento aceptable a costos accesibles. De igual manera, se compararon TPU dedicados solo a la aceleración de entrenamiento de redes neuronales artificiales. También se muestran las principales características que los proveedores muestran en sus datasheet.

Destacamos que las pruebas y resultados obtenidos en el entrenamiento de la red neuronal artificial del modelo propuesto por Nakampre sobre el Intel Neuronal Stick 2 fueron realizadas por los investigadores del presente trabajo, mediante las mismas pruebas realizadas a las GPU y a la TPU Nvidia Jetson Nano como fase experimental, al adquirir este dispositivo para aplicar redes neuronales artificiales en el análisis de imágenes en video requeridos en nuestras investigaciones.

Hemos observado que el trabajo de las GPU de bajo costo puede ser útiles para redes multicapa por la capacidad de almacenamiento y que, de igual manera, una vez terminado el desarrollo del hardware, puede ser reutilizado para acelerar los gráficos necesarios en aplicaciones como diseño gráfico o render 3d, mientras que las TPU proporcionan un hardware exclusivo de buen rendimiento en redes monocapa y, gracias a su tamaño y bajo consumo de energía, puede ser aplicado a cómputo móvil y robótica.



Como parte del trabajo futuro, se espera realizar el análisis de Intel Neuronal Stick 2 para la detección de plagas en cultivos, así como los procesos de pruebas bajo redes *multithreads* que permitan realizar más de una operación a la red neuronal artificial. Esto daría el panorama completo de la eficiencia de las TPU en el entrenamiento de las redes neuronales artificiales a bajo costo.

*Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops*, IPDPSW 2018, 589–598. DOI: 10.1109/IPDPSW.2018.00098

## Referencias bibliográficas:

- Basogain, X. O. (2005). Redes Neuronales Artificiales Y Sus Aplicaciones. *Medicina Intensiva*, 29(1), 13–20. [https://doi.org/10.1016/S0210-5691\(05\)74198-X](https://doi.org/10.1016/S0210-5691(05)74198-X)
- Florencio, F., Sergipe, U. F. De, Sergipe, U. F. De, David, E., Ordonez, M., & Sergipe, U. F. De. (2019). Performance Analysis of Deep Learning Libraries: TensorFlow and PyTorch. *Journal Computer Science*. (May).
- Guo, J., Liu, W., Wang, W., Lu, Q., Hu, S., Han, J., & Li, R. (2019). AccUDNN: A GPU Memory Efficient Accelerator for Training Ultra-deep Deep Neural Networks, (January). Retrieved from: <http://arxiv.org/abs/1901.06773>
- Kayid, A. M. (2018). *Performance of CPUs/GPUs for Deep Learning workloads*, (May 2018), 25.
- Moloney, D., Barry, C. B., Richmond, R., Connor, F., Brick, C., & Donohoe, D. (2014). *Movidius Myriad 2: Vision Processor*.
- Nakampe, M. (2018). *GroceryNet at the Edge using Intel Movidius Neural Compute Stick*. DOI: 10.13140/RG.2.2.13745.43360
- Rivas-Gomez, S., Pena, A. J., Moloney, D., Laure, E., & Markidis, S. (2018). Exploring the vision processing unit as co-processor for inference. *Proceedings - 2018 IEEE 32nd International*

# Los sistemas de información geográfica y el agua subterránea del estado de Puebla

José Erik Mendoza Mendoza

## Introducción

La problemática hídrica actual pertenece a una de índole ambiental, en el presente trabajo se estudia el caso del agua subterránea del estado de Puebla, México; ya que el mayor porcentaje de agua que es consumida en las ciudades (y por las poblaciones) proviene principalmente de los acuíferos. Por otro lado, en el estado se ubica uno de los acuíferos más sobreexplotados del país: el acuífero Valle de Tecamachalco.

Este acuífero está dentro de las primeras tres posiciones en cuanto a su magnitud de sobreexplotación, la cual llega casi a los cincuenta millones de metros cúbicos anuales. Este artículo muestra a través de un visor geoespacial elaborado con Google Maps los polígonos de los acuíferos, ya que es importante demostrar que, aunque no son perceptibles a simple vista, los acuíferos dependen en gran medida de las condiciones superficiales que coadyuvan o perjudican los procesos de infiltración y recarga hídrica.

Los recursos hídricos se han convertido en un tema que ha cobrado relevancia en la época en actual; siguiendo esta lógica Julio Casma (2015) menciona que América del Sur es privilegiada pues concentra un elevado porcentaje de recursos hídricos; estos recursos son obtenidos a través de dos tipos de fuentes de abastecimiento, las primeras son las superficiales en las que están incluidos los ríos, lagos, lagunas y, por otro lado, están las subterráneas que son los acuíferos, de hecho el “... 70% del agua que se suministra a las ciudades proviene del subsuelo” (Guerrero, Rives, Rodríguez, Saldívar y Cervantes, 2009, p.18). En México se tienen registrados 653 acuíferos de los cuales el 15.92% se encuentra en estado de sobreexplotación, es decir, el volumen extraído es mucho mayor que el de la Recarga Media Anual (RMA); por consiguiente, se acrecienta la disminución de sus niveles estáticos por la excesiva y descontrolada extracción del líquido.

El estado de Puebla se encuentra ubicado al Sureste del Altiplano del país, entre la Sierra Nevada y al Oeste de la Sierra Madre Oriental; sus coordenadas geo Gráficas son 19°03'05" N y 98°13'04" O. Limita al Norte con Veracruz, al sur con Oaxaca y Guerrero; al oeste con Morelos, Estado de México, Tlaxcala e Hidalgo y al este con Veracruz. Su superficie territorial es de 33,995 kilómetros cuadrados divididos en 217 municipios que representan el 1.7% del área total de la nación.

En el año 2000, el XII *Censo General de Población y Vivienda* reporto que su población era de "...5'076,686 personas de las cuales 2'448,801 eran hombres y 2'627,885 eran mujeres" (INEGI, 2000), para el año 2010 la población reportada fue "5, 779, 829 personas integradas por 2, 769, 855 hombres y 3, 009, 974 mujeres" (INEGI, 2010). De acuerdo a la proyección realizada por el Consejo Nacional de Población para el año 2030 se estima que la población para el estado de Puebla sea de "7'111,962 personas de las cuales 3'685,933 serán mujeres y hombres serán 3'426,029" (CONAPO, 2018).

Se precisa que en el estado se encuentra la cuarta ciudad más importante del país, así como industrias automotrices que distribuyen sus unidades a América Latina, además de la industria cárnica con la transnacional Granjas Carroll de México S. de R.L. de C.V., una de las principales productoras y exportadoras de carne de cerdo a China. Tal caracterización sugiere el grado de explotación de los recursos hídricos estatales, específicamente los acuíferos: en la entidad se cuenta con seis mantos acuíferos de los cuales dos presentan sobreexplotación tal a como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1.

Acuífero	Recarga Media Anual (RMA) (Millones de metros anuales)	Disponibilidad (Millones de metros anuales)
Valle de Tecamachalco	157.1	-49.102251*
Libres-Oriental	179.3	-0.351629*
Atlixco-Izúcar de Matamoros	244.3	47.141339
Valle de Puebla	360.7	44.647274
Valle de Tehuacán	246.9	35.622255
Ixcaquixtla	110.3	68.528305

Nota: Recarga Media Anual y Disponibilidad de los acuíferos del estado de Puebla. \*Acuíferos en estado de sobreexplotación ya que el volumen de extracción es mayor al volumen de la recarga media anual. Fuente: CONAGUA (2015a-g).

El aprovechamiento del agua en la entidad poblana presenta una clara tendencia hacia las actividades agrícolas, las cuales son las principales consumidoras, seguidas del uso público urbano, quizá por las zonas hortícolas y la sinergia económica que produce la instalación de la central de abastos de Huixcolotla, tal y como se puede observar en la Tabla 2 y en la Figura 1.

Tabla 2.

USO	AGUAS NACIONALES						
	AGUAS SUPERFICIALES			AGUAS SUBTERRÁNEAS			Volumen Total m³/año
	Títulos	Anexos	Volumen de extracción concesionado m³/año	Títulos	Anexos	Volumen de extracción concesionado m³/año	
AGRÍCOLA	1,068	1,233	886,979,727	4,240	4,352	600,030,486	1,487,010,213
AGROINDUSTRIAL	0	0	0	0	0	0	0
DOMÉSTICO	49	51	528,497	110	111	48,295	576,792
ACUACULTURA	44	45	87,657,804	2	2	48,863	87,706,667
SERVICIOS	28	33	28,151,518	251	256	8,145,837	36,297,355
INDUSTRIAL	28	36	2,549,648	291	357	43,806,441	46,356,089
PECUARIO	201	390	469,853	144	153	4,409,474	4,879,327
PÚBLICO URBANO	2,658	3,383	180,114,044	1,250	1,533	252,143,789	432,257,833
MÚLTIPLES	89	123	25,493,767	373	385	14,573,174	40,066,941
GENERACIÓN DE ENERGÍA	13	18	4,960,111,688	0	0	0	4,960,111,688
COMERCIO	0	0	0	0	0	0	0
OTROS	0	0	0	0	0	0	0
CONSERVACIÓN ECOLÓGICA	0	0	0	0	0	0	0
<b>Totales</b>	<b>4,178</b>	<b>5,312</b>	<b>6,172,056,546</b>	<b>6,661</b>	<b>7,149</b>	<b>923,206,359</b>	<b>7,095,262,905</b>

Nota: Aprovechamiento del agua superficial y subterránea en el estado de Puebla en el año 2017.  
Fuente: Gobierno de la República (2017).

En la Figura 1 se puede observar que las actividades agrícolas ocuparon en el año 2017 el 64.99% de los recursos hídricos subterráneos en todo el estado, seguido solo por el destino público urbano y el destino industrial con el 27.31% y 4.75% respectivamente, misma que corresponde con la que se desglosa en la Tabla 3, cuya información fue proporcionada por la Coordinación Estatal de Transparencia y Gobierno Abierto de Puebla en el año 2015.

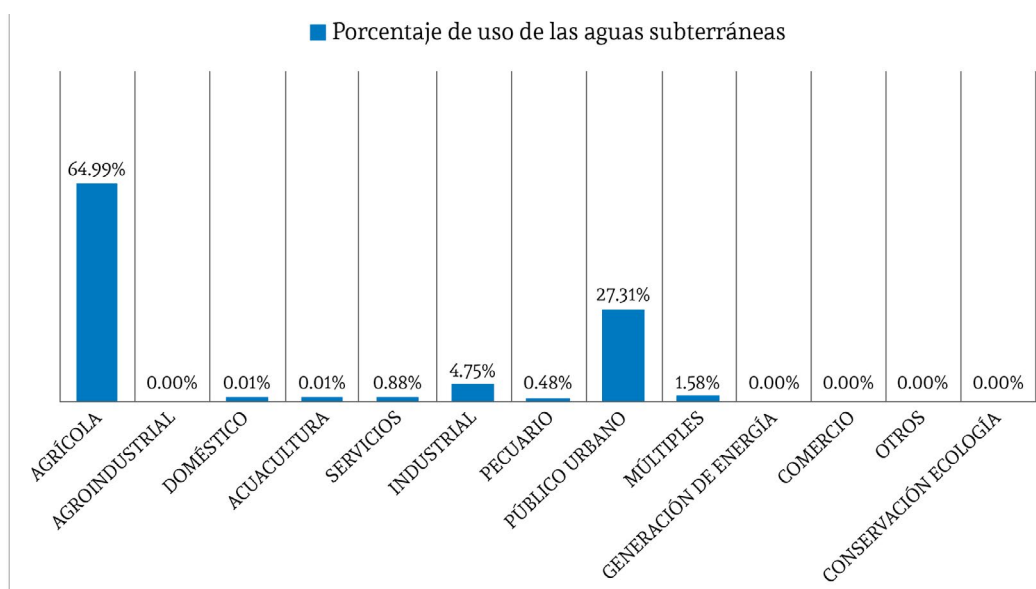


Figura 1. Porcentaje de uso por destino del agua subterránea en el año 2017. Fuente: Gobierno de la República (2017).



Tabla 3.

Indicador	Agrícola (%)	Abastecimiento público (%)	Industria autoabastecida (%)
México (nacional)	76.3	14.57	4.29
Puebla (estatal)	76.05	20.17	3.48

Nota: Porcentaje de uso de agua subterránea y superficial en el estado de Puebla para el año 2015. Fuente: Coordinación Estatal de Transparencia y Gobierno Abierto de Puebla (2015).

La política pública en el país se ha manifestado entre otras cosas en programas cuya finalidad es aprovechar el agua pluvial, para que, de alguna forma, se pueda mitigar el grado de explotación de los acuíferos del país y del estado. Un ejemplo de estos programas es el de Infraestructura Productiva para el Aprovechamiento Sustentable del Suelo y Agua (IPASSA) 2018 cuya finalidad es “... apoyar a grupos de productores(as) agropecuarios de las regiones con poca disponibilidad de agua y procesos de erosión del suelo para aprovechar sustentablemente los recursos naturales asociados con sus actividades productivas...” (Mantecón, 2019), cuyos conceptos de apoyo son las infraestructuras para captación, manejo y almacenamiento de agua y las prácticas de conservación de suelo y agua; a continuación se explican ambas:

**Infraestructuras para captación:** En cuanto a las infraestructuras para captación, manejo y almacenamiento de agua se encuentran la construcción de ollas de agua (véase Figura 2), que son “... depresiones sobre el terreno, que permiten almacenar agua proveniente de escurrimientos superficiales también conocidos como jagüeyes, cajas de agua, aljibes, trampas de agua o bordos de agua. Esto se logra generando una barrera impermeable mediante geomembranas de polietileno.” (ML ingeniería, 2018). Las ollas de agua almacenan y administran el agua de lluvia con fines generalmente pecuarios, siendo alternativo para que el ganado obtenga agua durante épocas de sequía, reduciendo los problemas ligados a la indisponibilidad del agua.



Figura 2. Olla de agua. Fuente: tomada de publimar.mx

Asimismo, se encuentran los tanques para almacenamiento de agua (véase Figura 3), que generalmente son construidos con mampostería y concreto de altas resistencias e impermeabilizados para evitar el deterioro y filtración por las paredes de la construcción.



Figura 3. Tanque de almacenamiento de agua.  
Fuente: tomada de aguasdesiguatetepeque.com

**PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN:** En cuanto a las prácticas de conservación de suelo y agua se tiene la construcción de terrazas (véase Figura 4), las cuales “... son un método eficaz para el control de erosión hídrica. Además, al reducir la velocidad del agua, mejora la infiltración y contribuyen al aumento del agua disponible en el perfil del suelo.” (Martín, 2018) las cuales son un método eficaz para el control de erosión hídrica. Además, al reducir la velocidad del agua, mejora la infiltración y contribuyen al aumento del agua disponible en el perfil del suelo.



Figura 4. Terraza. Fuente: tomada de Modecideas.com

Asimismo, se contempla la reforestación de zonas con degradación y pérdida forestal, la cual se realiza con especies endémicas cuya finalidad es apoyar en la recarga de los acuíferos, ver Figura 5.



Figura 5. Reforestación. Fuente: tomada de informador.mx

## Metodología

A) UBICAR LA POLIGONAL DEL ESTADO DE PUEBLA, LOS 217 MUNICIPIOS Y CADA ACUÍFERO ÚNICAMENTE DENTRO DEL TERRITORIO DE DICHA ENTIDAD: Esta actividad se llevó a cabo mediante el software Google Maps, en el cual primero se realizó la poligonal de cada municipio (véase Mapa 1 [Figura 6]), asimismo se asignó un marcador de posición que contiene el nombre de cada uno de estos. Posteriormente se realizaron la poligonal del estado (véase Mapa 1 [Figura 6]) y finalmente se elaboró la poligonal de cada uno de los seis acuíferos (véanse Mapas 2, 3, 4, 5, 6 y 7).



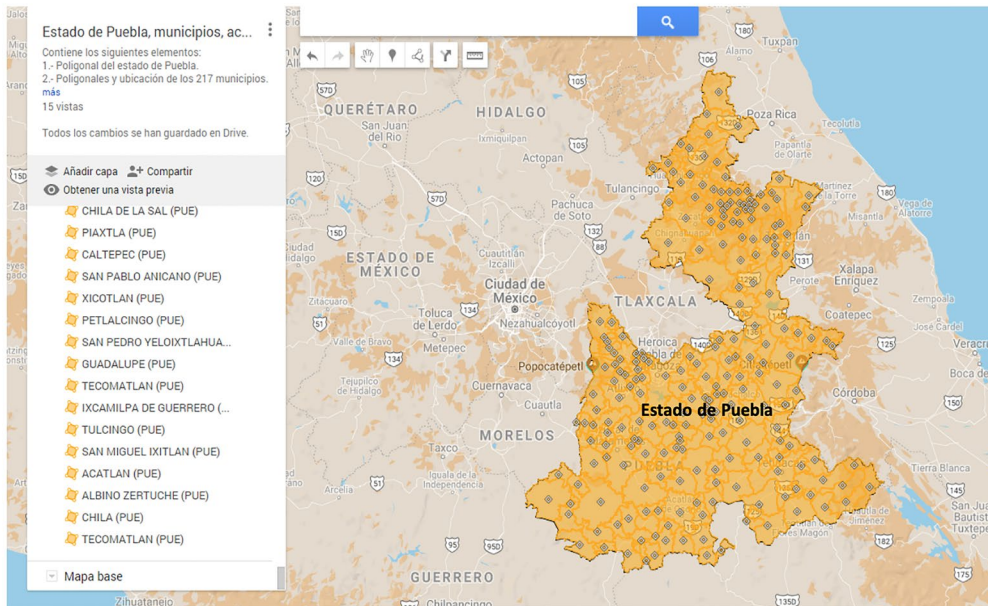


Figura 6. Mapa 1. Poligonal de los municipios y del estado de Puebla. Fuente: creación propia mediante Google Maps.

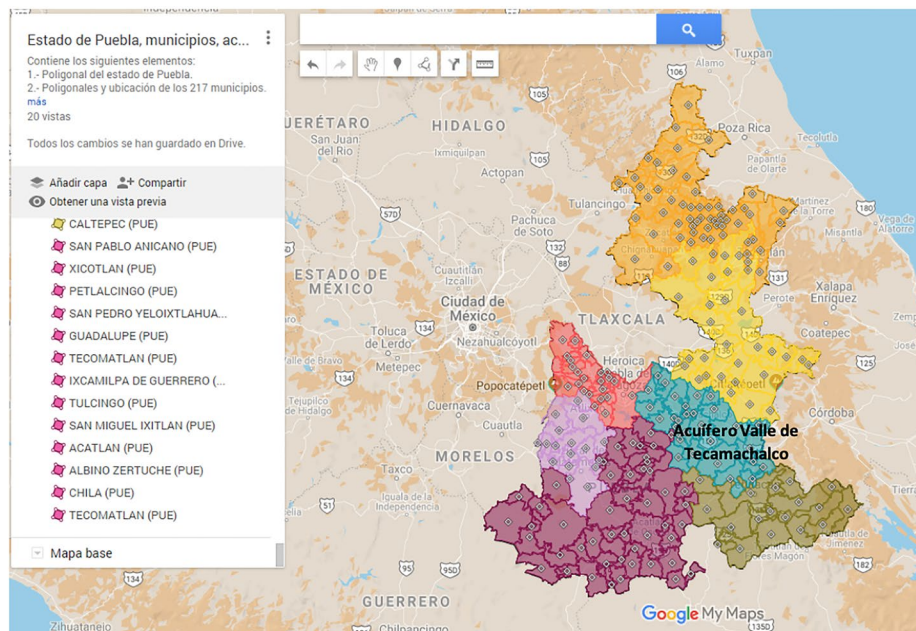


Figura 7. Mapa 2. Poligonal del acuífero 2101 Valle de Tecamachalco. Fuente: creación propia mediante Google Maps.



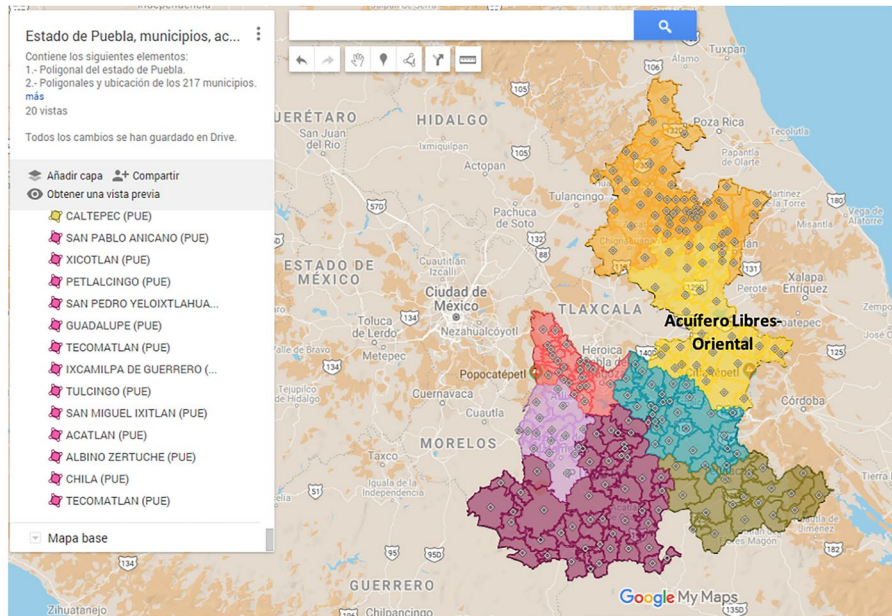


Figura 8. Mapa 3. Poligonal del acuífero 2102 Libres-Oriental. Fuente: creación propia mediante Google Maps.

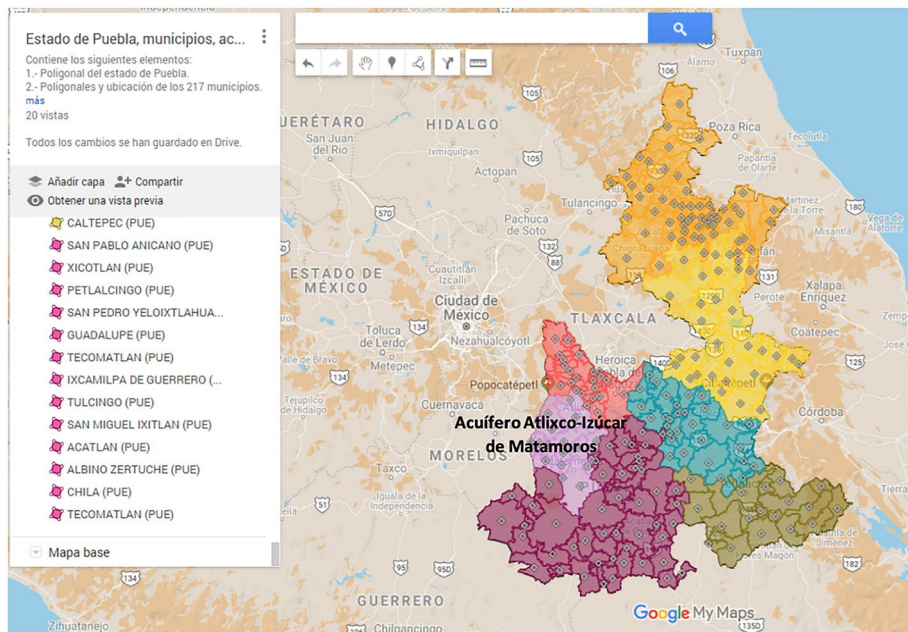


Figura 9. Mapa 4. Poligonal del acuífero 2103 Atlixco-Izúcar de Matamoros. Fuente: creación propia mediante Google Maps.

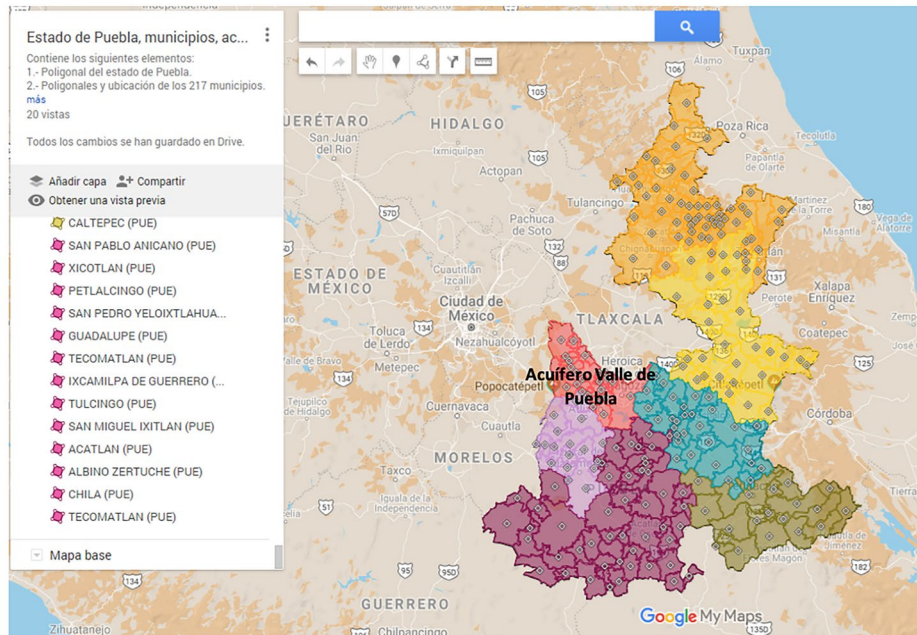


Figura 10. Mapa 5. Poligonal del acuífero 2104 Valle de Puebla. Fuente: creación propia mediante Google Maps.

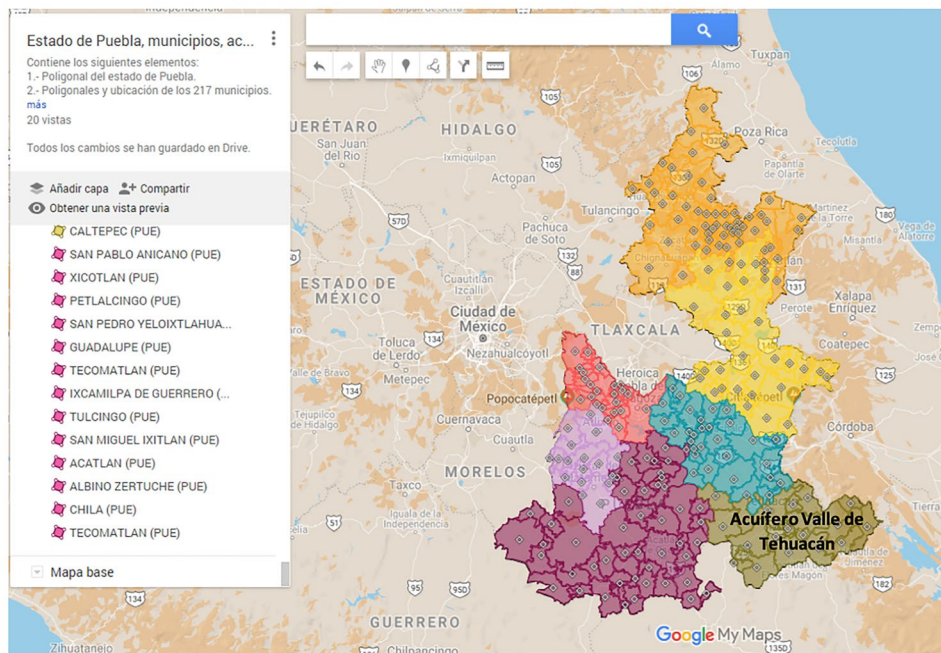


Figura 11. Mapa 6. Poligonal del acuífero 2105 Valle de Tehuacán. Fuente: creación propia mediante Google Maps.



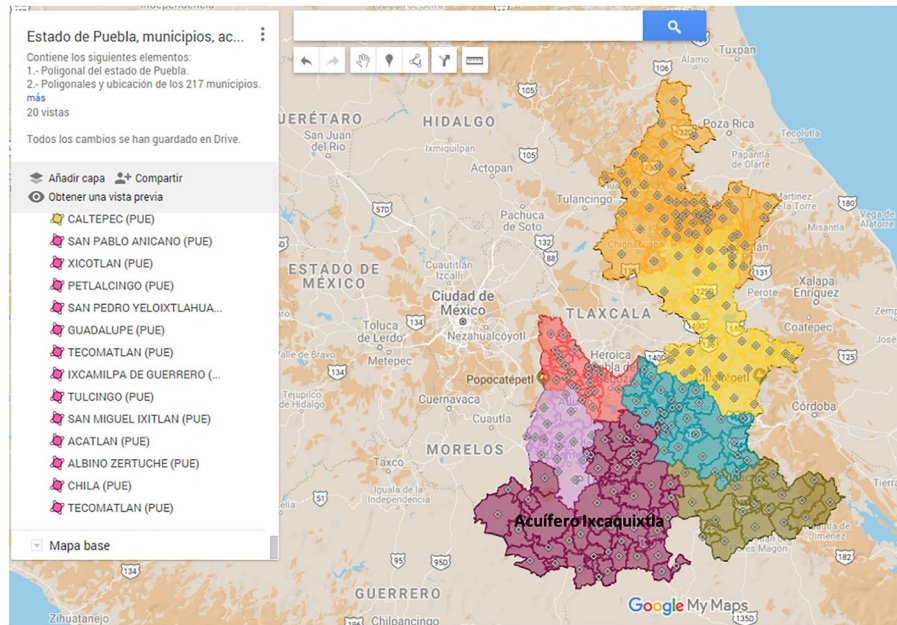


Figura 12. Mapa 7. Poligonal del acuífero 2106 Ixcaquixtla. Fuente: creación propia mediante Google Map

## Resultados

De acuerdo al estudio realizado se identificó que el estado presenta una problemática hídrica que tiene que ver con el déficit por sobreexplotación de dos de sus seis acuíferos. La situación es sumamente grave en el acuífero del Valle de Tecamachalco debido a que el déficit es de casi cincuenta millones de metros cúbicos anuales, asimismo en la región oriente del estado se encuentra el acuífero Libres-Oriental el cual también presenta déficit aunque en un grado mucho menor de -0.351629 millones de metros cúbicos anuales. En la Figura 13 se muestra la aportación parcial de cada acuífero al total de agua subterránea del estado de Puebla. En ella se observa que los dos acuíferos con sobreexplotación aportan aproximadamente la cuarta parte del total del agua subterránea estatal, por lo que es urgente entablar acciones concretas en el tema.

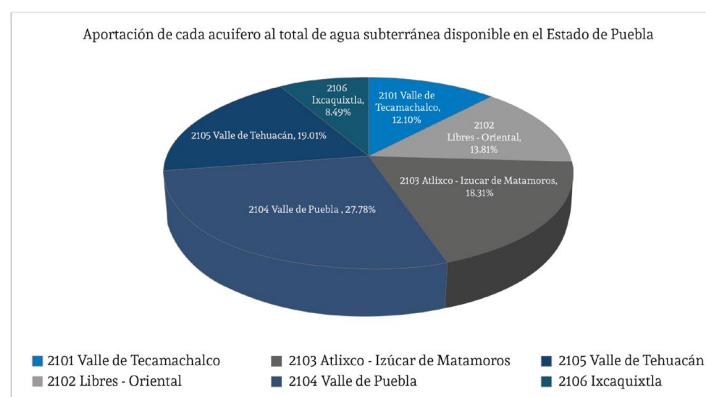


Figura 13. Aportación parcial de cada acuífero al total de agua subterránea del estado de Puebla en el año 2015. Fuente: Creación propia a partir de Comisión Nacional del Agua CONAGUA (2015).

Figura 13. Aportación parcial de cada acuífero al total de agua subterránea del estado de Puebla en el año 2015. Fuente: Creación propia a partir de Comisión Nacional del Agua CONAGUA (2015).

## Conclusiones

Finalmente se concluye que:

- En el estado de Puebla las actividades agrícolas son las principales consumidoras de agua subterránea, seguidas de las actividades del ámbito público urbano.
- Los dos acuíferos en sobreexplotación aportan la cuarta parte del total del agua subterránea del estado. Se observa que se encuentran en zonas con escasa riqueza forestal.
- Es urgente establecer acciones encaminadas a la recarga artificial y/o natural de acuíferos, de lo contrario, la sobreexplotación seguirá creciendo.

## Referencias bibliográficas

- Academia Nacional de Ciencias. (2018). *Agua subterránea*. Recuperado de: <https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Sources/Renewable-or-Non-renewable-Groundwater.html>
- Casma, J. (28 de marzo de 2015). Brasil, Colombia y Perú, entre los que más agua tienen en el mundo. *El País Internacional* [Periódico digital]. Recuperado de: [https://elpais.com/internacional/2015/03/04/actualidad/1425491803\\_078422.html](https://elpais.com/internacional/2015/03/04/actualidad/1425491803_078422.html)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Tecamachalco (2101), Estado de Puebla*. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103299/DR\\_2101.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103299/DR_2101.pdf)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Libres-Oriental (2102), Estado de Puebla*. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103300/DR\\_2102.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103300/DR_2102.pdf)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Atlixco-Izúcar de Matamoros (2103), Estado de Puebla*. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103301/DR\\_2103.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103301/DR_2103.pdf)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Puebla (2104), Estado de Puebla*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/>



- attachment/file/273105/DR\_2104\_VALLE\_DE\_PUEBLA.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Tehuacán (2105), Estado de Puebla*. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103303/DR\\_2105.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103303/DR_2105.pdf)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ixcaquixtla (2106), Estado de Puebla*. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103304/DR\\_2106.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103304/DR_2106.pdf)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Disponibilidad por Acuíferos. Puebla*. Recuperado: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/puebla-74845>
- Consejo Nacional de Población. (2018). *Proyecciones de la Población de México y de las Entidades Federativas, 2016-2050*. Recuperado de: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-y-de-las-entidades-federativas-2016-2050>
- Coordinación Estatal de Transparencia y Gobierno Abierto de Puebla. (2015). Histórico uso consuntivo agua subterránea y superficial en el estado de Puebla. *Datos Abiertos*. Recuperado de: [http://datos.puebla.gob.mx/datos/historico-uso-consuntivo-agua-subterranea-superficial-estado-puebla-20151231-csv#{view-graph:{graphOptions:{hooks:{processOffset:\[\],bindEvents:\[\]}},graphOptions:{hooks:{processOffset:\[\],bindEvents:\[\]}}](http://datos.puebla.gob.mx/datos/historico-uso-consuntivo-agua-subterranea-superficial-estado-puebla-20151231-csv#{view-graph:{graphOptions:{hooks:{processOffset:[],bindEvents:[]}},graphOptions:{hooks:{processOffset:[],bindEvents:[]}})
- Gobierno de la República (2017). *Estado de Puebla. Títulos y Volúmenes de Aguas Nacionales y Bienes Inherentes por Uso de Agua*. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232535/19\\_junio\\_2017\\_pue.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232535/19_junio_2017_pue.pdf)
- Guerrero, T., Rives, C., Rodríguez, A., Saldívar, Y. y Cervantes. V. (2009). El agua en la Ciudad de México. *Ciencias*, 94, 16-23. Recuperado de: <http://www.revistaciencias.unam.mx/es/43-revistas/revista-ciencias-94/203-el-agua-en-la-ciudad-de-mexico.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2000). *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/default.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- Mantecón, R. (08 de abril de 2019) Brinda SEDAPA apoyos para crear infraestructura en regiones con poca disponibilidad de agua. Comunicación: *Coordinación General de Comunicación Social y Vocería del Gobierno del Estado*. Recuperado de: <https://www.oaxaca.gob.mx/comunicacion/2019/04/08/brinda-sedapa-apoyos-para-crear-infraestructura-en-regiones-con-poca-disponibilidad-de-agua/>
- Martín, J. (2018). *Las terrazas para controlar la erosión hídrica*. Agritotal. Recuperado de: <http://www.agritotal.com/nota/controlar-con-terrazas/>
- ML Ingeniería (2018). Ollas de captación. Recuperado de: <https://mlingenieria.com/ollas-de-captacion/>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2018). *Infraestructura Productiva para el Aprovechamiento Sustentable del Suelo y Agua (IPASSA) 2018*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/sagarpa/acciones-y-programas/componente-infraestructura-productiva-para-el-aprovechamiento-sustentable-del-suelo-y-agua-ipassa-ejecucion-nacional-2018>.



**UVP**  
UNIVERSIDAD  
DEL VALLE  
DE PUEBLA

3 Sur 5759 Col. El Cerrito C.P. 72440, Puebla, Pue.

**UVP, MI MEJOR YO**

