



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Eléctrica

**Estudio del uso real y potencial de energía solar a
nivel mundial
a partir de cartografía de radiación solar y variables
socioeconómicas**

Autor:

Frutos Alonso, Fernando

Tutor:

**Quintano Pastor, Carmen
Fernández Manso, Alfonso**

Valladolid, Mayo 2019

Índice

1. Resumen y palabras clave	5
2. Introducción	7
3. Objetivos	9
4. Desarrollo	11
4.1. Estado del arte	11
4.2. Método	23
5. Conclusiones.....	79
6. Bibliografía	85

1. Resumen y palabras clave

En el presente Trabajo de Fin de Grado se trata de estudiar cuál es el uso real de la energía solar a nivel mundial y estudiar su potencial mediante cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas.

Para ello se extraen variables con las que trabajar mediante software estadístico. Se analizarán después los resultados obtenidos. También se analizará la situación real del estado de la energía solar de las regiones más representativas.

El trabajo finalizará con las conclusiones extraídas tanto del análisis de los datos obtenidos de las variables como de la situación real mundial.

Palabras clave

Energía

Electricidad

Fotovoltaica

Solar

Radiación

2. Introducción

Evolucionar es sinónimo de cambiar, transformar. A lo largo de millones de años hemos mejorado nuestra esperanza y calidad de vida debido a los avances en ciencia y tecnología. Uno de los muchos campos en los que el ser humano ha experimentado esta evolución es el campo de la energía.

El uso y el aprovechamiento de la energía han tenido una gran influencia en el desarrollo humano a nivel económico, cultural y social. Desde el control de la energía térmica mediante el fuego, que permitió procesar alimentos o ahuyentar animales salvajes, hasta el aprovechamiento de la energía eólica para navegar por los mares y facilitar la comunicación y transporte, pasando por el uso de energía hidráulica mediante molinos para realizar trabajos mecánicos.

Estas energías tenían en común el tipo de fuente, su origen, eran energías renovables. Son denominadas renovables ya que pueden renovarse de forma natural sin llegar a agotarse a corto plazo y no suponen un impacto severo en el planeta. Sin embargo, el aumento de nuestro conocimiento y nuestra capacidad de adaptar nuestro entorno a nuestras necesidades trajo consigo el descubrimiento de nuevas fuentes de energía que resultaban más atractivas por el trabajo que se podía extraer de ellas, las fuentes de energía no renovables.

Estas fuentes de energía tuvieron un gran despegue tras la combinación de combustibles fósiles con máquinas de vapor, esto es, tras el comienzo de la revolución industrial.

El trabajo manual fue decreciendo en favor de la maquinaria y el transporte pasó de utilizar animales como forma de tracción y largos periodos de tiempo de viaje a utilizar grandes vehículos a vapor que transportaban más mercancía y pasajeros en mucho menos tiempo, alimentados por carbón.

Posteriormente, el control y desarrollo de la energía eléctrica acabó suponiendo un incremento del consumo de combustible fósil para obtener una generación de electricidad que cada vez era más demandada. Las ventajas que estos cambios produjeron a nivel social, pero sobre todo a nivel económico, hicieron que el uso de los combustibles fósiles se expandiera en los países más desarrollados y al igual que su explotación en los lugares donde se encontraban.

Desde entonces y hasta hoy en día, esta tecnología ha predominado en la generación de energía con la ayuda de nuevas técnicas perfeccionadas para su extracción y utilización, junto al descubrimiento de nuevos combustibles no renovables (energía nuclear) y el apoyo de las fuentes de energía no renovables.

Actualmente el 80% de la energía consumida en el mundo procede de los combustibles fósiles según datos del Banco Mundial. Diversos estudios y estadísticas realizados por agencias del sector de la energía apuntan a que la producción de este tipo de combustible ha llegado a su máximo (EEO, 2012) y que por lo tanto comenzará a decrecer en los próximos años.

A consecuencia de esto, es necesario cubrir la demanda incrementando el porcentaje de consumo de las tecnologías renovables, lo que a su vez conlleva a un aumento de la instalación de plantas de generación de tipo renovable. Para obtener un aprovechamiento óptimo de los recursos naturales y poder mantener el estilo de vida de hoy en día, es necesario saber de qué recursos disponemos, de cómo están aprovechados y de las mejoras tecnológicas que se podrían investigar y desarrollar.

Durante el desarrollo de este trabajo de fin de grado se estudiará el potencial de la energía solar a nivel mundial, una de las energías renovables de las que disponemos actualmente. Una energía que nos da la posibilidad de mantener un desarrollo sostenible que nos permita seguir cambiando, transformando y evolucionando.

3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es estudiar a nivel mundial el uso real y potencial de la energía solar partiendo datos cartográficos sobre radiación solar y de diversas variables socioeconómicas. Este objetivo principal puede desglosarse en siguientes objetivos secundarios:

1.- Obtener medidas relacionadas con la energía solar recibida por cada país a partir de datos sobre radiación solar. En concreto: la irradiación normal directa (Direct Normal Irradiation, DNI) y la electricidad fotovoltaica potencial que puede ser obtenida (Photovoltaic Electricity output, PVOUT)

2.- Extraer variables de carácter económico y social de los países/grupos de países considerados a partir, principalmente, de la información proporcionada por el banco mundial (la energía consumida, el PIB, entre otras).

3.- Relacionar estadísticamente las medidas relativas a la irradiación solar con las variables sociales y económicas, analizando los resultados.

4.- Realizar un estudio sobre la situación concreta de países representativos, observando los resultados previos y sacando conclusiones.

Para alcanzar estos objetivos en este estudio se tratará de responder a las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es el potencial de la energía solar a nivel mundial?
- ¿Cómo está distribuida la radiación solar en el mapa global?
- ¿Qué variables de carácter económico y social pueden ayudar a estudiar mejor el potencial de la energía solar?
- ¿Qué cálculos se realizan para obtener resultados que representen mejor la realidad?
- ¿Qué países son más representativos de las diferentes formas de explotación de la energía solar?
- ¿Cuáles son las conclusiones finales?

4. Desarrollo

4.1. Estado del arte

4.1.1. Bases Teóricas

4.1.1.1 Irradiación normal directa

El sol es la estrella más cercana a nuestro planeta, la cual está compuesta por hidrógeno y helio principalmente. En su interior se desarrollan reacciones de fusión nuclear que liberan una enorme cantidad de energía, que es emitida a través del espacio. Esta transferencia de energía es la radiación solar que recibe nuestro planeta.

La radiación solar está formada por radiaciones de diferentes longitudes de onda, desde el infrarrojo hasta la ultravioleta. Sin embargo, una parte de dicha radiación no atraviesa la atmósfera, que hace las veces de filtro de las ondas ultravioletas más cortas. Una parte es reflejada al espacio, en torno al 30%, mientras que el resto es absorbido por la atmósfera, mar y tierra. Esta radiación también varía debido al ciclo día/noche y la órbita elíptica que describe el planeta sobre el Sol.

Para medir la cantidad de radiación solar sobre la superficie se utiliza la irradiancia, cuya unidad es el W/m^2 , es decir, la potencia que incide por unidad de superficie. Mientras que la irradiación solar es la cantidad de irradiancia recibida durante un periodo de tiempo, medida en Wh/m^2 . El valor máximo que la irradiancia puede alcanzar en un día despejado son $1000 W/m^2$.

Como acabamos de ver, la radiación solar atraviesa la atmósfera en su trayectoria, lo que conlleva que interaccione con los elementos que la componen, además de poder encontrarse en su camino con otros objetos. Este fenómeno da lugar a dos tipos de irradiación, la irradiación solar directa y la irradiación solar difusa.

La irradiación solar directa es aquella cuya trayectoria no ha sido desviada por algún elemento u objeto, proviene directamente del sol sin ningún cambio de dirección. Por otro lado, la irradiación solar difusa es aquella cuya dirección ha sido desviada por algún motivo. La suma de ambas da como resultado la irradiación solar total.

A su vez se pueden distinguir tres tipos de irradiaciones según la superficie que la recibe. La irradiación normal es la irradiación recibida en una superficie perpendicular a los rayos solares. Esto implica que dicha superficie debe

moverse a lo largo del día para que se mantenga esta perpendicularidad, siguiendo el movimiento del sol. Si la superficie que recibe la irradiación es perpendicular al radio de la tierra, esta se denomina irradiación horizontal. Lo más habitual es recibir la irradiación en un plano inclinado fijo que optimice la recepción. Esto es denominado como irradiación en plano inclinado.

La irradiación normal directa será entonces la irradiación que recibe una superficie móvil que persigue la trayectoria del sol tal que el ángulo de incidencia de la irradiación con la superficie sea en todo momento igual a 90° y además esa irradiación debe provenir directamente del sol, sin haber sufrido modificaciones en su trayectoria.

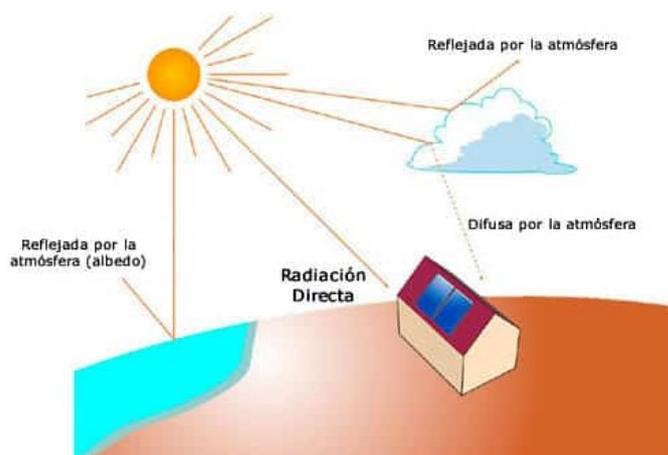


Imagen 1 Tipos de radiación. (Fuente: SunFields)

La irradiancia se puede medir mediante dos instrumentos, dependiendo del tipo de irradiancia que se quiera medir. Los piranómetros miden la irradiancia global y difusa, mientras que para poder medir la componente directa de la irradiancia es necesario disponer de un pirheliómetro. Este instrumento contiene una termopila a la que llegan los haces de luz directos del Sol y de una región anular del cielo cercana a éste. Los pirheliómetros más avanzados pueden llegar a abarcar un semiángulo de $2,5^\circ$ a partir del centro del Sol. La termopila, debido a un gradiente de temperatura, genera un voltaje que mediante fórmulas se puede llegar a las unidades W/m^2 , lo cual nos permite saber la irradiancia directa durante el periodo de tiempo de medición. Estos instrumentos suelen estar acoplados a sistemas de seguimiento solares.



Imagen 2 Pirheliómetro. (Fuente: Sensovant)

A la hora de hacer previsiones, debemos tener claro que el uso de la irradiación normal directa es recomendable para previsiones a largo plazo debido al carácter variable de la irradiación. La irradiación normal directa es la única componente de la radiación solar que puede pasar de su valor máximo al mínimo en pocos segundos, ya que le afectan factores como la velocidad de las nubes o la posición.

4.1.1.2 PVOUT

La unidad Watio pico, W_p , está referida a la medida de la máxima potencia eléctrica que puede generar un elemento fotovoltaico bajo las Condiciones de Medida Estándar (STC) bajo un laboratorio, las cuales son:

- Irradiancia= 1000 W/m^2
- Temperatura= 25° C
- AM= 1,5

AM, masa de aire, es la medida de la distancia que recorre la radiación al penetrar en la atmósfera. Ésta varía según el ángulo de incidencia del rayo de Sol en la vertical del lugar

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)}$$

Esta medida no expresa la potencia máxima que puede generar un elemento fotovoltaico, ya que variando las condiciones puede llegar a obtenerse más potencia.

Por lo tanto, la energía fotovoltaica potencial, PVOUT, que aparece medida en el mapa de la figura 3, está referida a la energía que se produciría por cada kWp instalado.

4.1.2. Combustibles fósiles

Marion King Hubbert fue un geofísico norteamericano conocido por su Teoría del pico de Hubbert, la cual predijo en 1956 que la producción total de petróleo de los Estados Unidos llegaría a su máximo entre finales de los años 60 y principios de los 70. Una vez que esta predicción se hizo realidad, supuso la confirmación de que los combustibles fósiles terminarán desapareciendo como recurso. La fecha en la que esto ocurra dependerá del descubrimiento de nuevos yacimientos y del avance de la tecnología que aprovecha estos recursos.

Debido al conflicto de intereses, pocos estudios arrojan fechas similares cuando se habla del momento en el cual se ha alcanzado el pico de producción de estos combustibles. Si nos quedamos con las previsiones más optimistas, las reservas no deberían agotarse hasta dentro de 100 años. Teniendo en cuenta que actualmente el consumo de energía procedente de combustibles fósiles supone un 80% del total de energía consumida a nivel mundial, nos presentamos ante una situación de cambio que tendrá efectos sobre la economía, la sociedad y el planeta.

Además del agotamiento de los yacimientos de combustibles fósiles, existe otro motivo por el cual su uso se verá reducido en los próximos años, el impacto ambiental. Las principales fuentes de emisiones perjudiciales para el planeta y que no tienen un origen natural son los sectores de la industria, generación de electricidad, transporte y consumo energético urbano.

La Agencia Internacional de la Energía acuña el término 2DS (2°C Scenario) como la estrategia a seguir por parte de la industria para obtener por lo menos un 50% de posibilidades de limitar el aumento de la temperatura global en 2°C, limitando el total restante de emisiones de CO₂ entre 2015 y 2100 en 1000 Gt de CO₂. Además, reduce las emisiones en casi un 60% en el año 2050 en comparación con las de 2013 debido a la caída del consumo de carbón supuesta para ese año. Está relacionado con uno de los objetivos fijados por el Acuerdo de París del año 2015, que establece las bases para reducir los gases de efecto invernadero y que entra en vigor a partir del año 2020 tomando el relevo del Protocolo de Kyoto. Uno de sus objetivos es el de mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2°C con respecto a niveles preindustriales y promover esfuerzos para conseguir que no se superen los 1.5°C. Las consecuencias del aumento de la temperatura pueden ser catastróficas, incluso cumpliendo con el acuerdo, ya que se provocaría el deshielo de los glaciares con las correspondientes inundaciones y el clima se volvería mucho más extremo afectando al ser humano y el planeta.

En industria, el incremento en emisiones de CO₂ entre 2014 y 2025 debe ser del 0.1% para cumplir con este objetivo, en el presente no se lleva una buena proyección al estar este parámetro en el 1.1%. Debido a esto se requiere un esfuerzo en este sector implementando tecnologías que permitan una mayor eficiencia.

Analizando los diversos sectores que componen la industria, podemos observar que la industria petroquímica ha reducido el uso de combustibles fósiles en los últimos años. La industria papelera ha incrementado solamente un 1% el consumo de energía desde el año 2000 consiguiendo incrementar su producción un 23%. Aún así, podrían mejorarse estos datos con un mayor y mejor reciclado.

En cuanto a la industria cementera, el consumo de energía debe aumentar como máximo un 0.5% al año en 2025. Para ello debe reducirse el consumo de combustibles fósiles aumentando el de combustibles alternativos.

El uso del horno de arco eléctrico en la industria del acero y hierro estaba situado en un 30% en 2014. Para conseguir los objetivos del 2DS, se debe aumentar a un 40% para el año 2025, disminuyendo así la demanda de energía en un 6% y reduciendo las emisiones de CO₂ en un 11%. Aún así, los altos hornos y la acería al oxígeno siguen aumentando en número.

Por último, la industria del aluminio deberá limitar su aumento de consumo de energía a un 4.3% para el año 2025, siendo para ello necesario el desarrollo de nuevas tecnologías que mejoren la eficiencia de la producción y el fomento del reciclaje.

En el sector de la generación de electricidad, existen dos tipos de tecnologías que están llamadas a disminuir su importancia en los años venideros, las centrales térmicas y las centrales nucleares. Las centrales térmicas, en especial las que utilizan como combustible carbón, desprenden una gran cantidad de contaminantes compuestos por:

- Monóxido y dióxido de carbono: El monóxido de carbono se produce cuando la combustión del carbón no es completa. No es un problema importante ya que sólo el 1% de las emisiones de CO provienen de las centrales. El dióxido de carbono es el gas que más contribuye al efecto invernadero y es producido siempre que se realice una combustión con un combustible fósil.

- Óxidos de nitrógeno: Se forman durante la combustión por oxidación del nitrógeno presente tanto en el aire como el combustible. La mayor parte de estos óxidos es monóxido de nitrógeno, el cual se oxida en la atmósfera

formando dióxido de nitrógeno, que provoca que la atmósfera se ensucie, se destruya la capa de ozono y genere lluvia ácida. Estas emisiones de óxidos suponen un tercio del total.

- Óxidos de azufre: El azufre que forma parte del combustible se emite en forma de gas pudiéndose transformar en ácido sulfúrico o iones sulfato que son causantes de la lluvia ácida, formación de nieblas y de la destrucción de la clorofila. Las emisiones producidas por las centrales suponen un 80% del total.

- Partículas: Cenizas volantes y escorias que se generan tras el proceso de combustión. La mayor parte se extraen de manera controlada aunque algunas acaban en la atmósfera mediante la chimenea.

Debido a este problema, las centrales toman medidas para reducir en medida de lo posible las emisiones mediante:

- Tratamientos antes del proceso de combustión: Su objetivo es preparar y limpiar el carbón para reducir las partículas y los óxidos de azufre.

- Tratamientos durante el proceso de combustión: Se reducen los óxidos de azufre y nitrógeno modificando la combustión y atrapando los gases antes de su salida a la atmósfera.

- Tratamientos después del proceso de combustión: Se eliminan los elementos contaminantes de los gases mediante precipitadores electrostáticos y procesos de desulfuración.

Además de estas tecnologías, se encuentran en desarrollo otros tratamientos que disminuyan el impacto que tienen las centrales térmicas, como son la combustión en lecho fluido, captura y almacenamiento de CO₂ y gasificación del carbón integrada en ciclo combinado.

Las centrales térmicas suponen aproximadamente la producción de un 70% de la energía que se consume. La generación de las centrales que utilizan gas natural aumentó su generación en un 2.2% en 2014. En los países de la OCDE por su parte se incrementó en un 7.1% en 2015 y con signos de seguir el mismo camino. Teniendo en cuenta que el consumo global debería estar en el 2.4% en 2025 para cumplir con el objetivo 2DS, las previsiones son positivas aunque se debe seguir trabajando para reducir las al mínimo posible. Si observamos las centrales alimentadas por carbón, deberían reducir sus emisiones de media un 3% por año hasta 2025. Debido a esto las políticas de energía de los países deberían ir orientadas lo más rápido posible al cierre de algunas centrales.

Si nos referimos a las centrales nucleares, estas obtienen energía mediante la fisión, por lo que se evita emitir a la atmósfera gases de efecto invernadero o partículas durante ese proceso de fisión, sólo se produce contaminación de este tipo en la extracción y transformación del uranio, que es el combustible más común en este tipo de centrales. Sin embargo, el combustible una vez gastado sí supone una fuente de contaminación debido a la radiación y calor que desprende. El calor no supone un grave problema al disminuir de forma rápida, ni las radiaciones gamma que tiene una vida corta. La radiación alfa es el principal problema puesto que pueden pasar miles de años hasta que se desintegre.

Los tratamientos a los que el combustible es sometido una vez agotado para reducir el impacto de estas radiaciones son:

- Almacenamiento inicial: El combustible utilizado se introduce por completo en piscinas donde se disipa el calor que desprende y el agua actúa como blindaje frente a las emisiones de radiación. El combustible suele permanecer en la piscina como mínimo 5 años hasta su retirada.

- Almacenamiento o reprocesado: Una vez enfriado, existen dos posibles tratamientos, almacenamiento o reciclado. La etapa de almacenamiento consiste en un almacenamiento en seco temporal situados en la propia central, denominados ATI (Almacenamiento Temporal Individual). Sin embargo, esta solución no es la mejor a medio plazo por el coste de mantenimiento, por lo que surge la opción de un almacenamiento centralizado (ATC) para una mejor optimización. La otra posibilidad, reprocesado, consiste en reciclar el combustible para poder ser reutilizado y generar menos residuos. Una vez llevado a cabo cualquiera de estos tratamientos, se procede al almacenamiento definitivo.

La tecnología nuclear no es valorada a nivel social debido a los residuos de larga duración que genera y a diversos accidentes ocurridos en la historia. Además, la opción de obtener armamento por la producción de plutonio obliga a vigilar de cerca a los países que lo desarrollan y da lugar a controversia en la población.

No obstante, se desarrollan e investigan reactores que mejoran a los anteriores en seguridad, eficiencia y fiabilidad. Son reactores diseñados desde cero, con el fin de reducir los costes elevados a la hora de su construcción, utilizar el combustible de manera más eficiente para minimizar los residuos generados y evitar en la medida de lo posible el uso de esta tecnología con fines bélicos.

Las centrales nucleares producen en torno al 11% de la generación mundial de electricidad. Existe disparidad de modelos de generación de electricidad en el mundo. Los países con mayor número de reactores en funcionamiento, y por lo tanto en producción, son Estados Unidos con 99 reactores, Francia con 58, en Japón 42 reactores, 36 en China y 35 en Rusia. Como ejemplo de diferencia en políticas de generación, China está llevando a cabo la construcción de 21 reactores, mientras que Alemania en 2011 a raíz del accidente nuclear ocurrido en Fukushima Daiichi anunció un plan para abandonar la energía nuclear en el año 2022, contando actualmente con 8 reactores en activo.

En el ámbito del transporte, la mayoría de emisiones nocivas para la naturaleza proviene de los turismos impulsados por motores de combustión interna. Estos vehículos expulsan diferentes gases tras la combustión del combustible con el oxígeno, como son el dióxido de carbono, monóxido de carbono, restos de hidrocarburos no quemados y óxidos de nitrógeno.

Hoy en día en torno al 27% de la energía total consumida corresponde al sector del transporte, la mayoría de la cual está representada por el transporte por carretera. En los últimos años han entrado en escena los biocombustibles, que contienen derivados a partir de biomasa, como por ejemplo azúcar, trigo y maíz. Este biocombustible ayuda a reducir el CO₂ ya que absorbe al crecer el dióxido emitido al ser quemado. Si bien es cierto que el aumento del consumo de este combustible se ha estancado, se está estudiando la aplicación de esta tecnología a transportes diferentes del individual, como vehículos pesados, aviación y transporte marítimo. Por el contrario, los vehículos de tracción eléctrica han pasado de 200000 unidades en 2013 a 1.2 millones en 2016.

Una de las opciones que se debaten sobre el futuro del transporte es el paso de un sistema individual a uno más público, con el fin de reducir el consumo de recursos, la contaminación y el impacto que tendrá el aumento de consumo de electricidad al aumentar el número de vehículos eléctricos. Por ejemplo, las estimaciones de la Agencia Europea del Medio Ambiente son que para el año 2050 el 80% de los vehículos podrían ser eléctricos y dependiendo de la fuente de energía se podrían reducir las emisiones nocivas. Este supuesto también podría provocar problemas en el suministro de electricidad, ya que hay redes que no están preparadas para recargas de baterías en puntas de demanda. Una posible solución que se estudia en Reino Unido es que la red pueda extraer energía de las baterías durante horas punta para poder equilibrar la oferta y la demanda, garantizando que los coches estén cargados por completo por la mañana.

Si observamos el transporte marítimo, sólo consume un 2.5% de la energía que consume el transporte en total. Teniendo en cuenta que transporta el 90% de la carga que se mueve en el mundo, no supone un problema de extrema urgencia pero sí que es necesario que se produzcan investigaciones sobre nuevos sistemas de tracción para este medio. El transporte aéreo sin embargo sí que urge el acuerdo y desarrollo de nuevos combustibles, ya que a día de hoy sólo 2500 vuelos comerciales se realizan con combustibles alternativos a los convencionales.

Por último, el consumo energético urbano por persona ha permanecido constante desde 1990, situándose en 5 MWh. Este dato debería bajar para el 2025 hasta un mínimo de 4.5 MWh para cumplir el objetivo 2DS. La mejora en la construcción de edificios, utilizando materiales que aíslen y retengan mejor el calor, técnicas más sencillas que disminuyan el tiempo de construcción y el uso de máquinas de gran consumo e instalación de productos más eficientes como lámparas de tecnología LED y calefacción programada deberían ser suficientes si se aplican en el presente para cumplir los objetivos.

4.1.3. Fuentes de energía renovable

En un sistema energético debe existir un equilibrio entre la oferta y la demanda. Como hemos visto, los combustibles fósiles tienen fecha de caducidad y además debemos reducir las emisiones que son perjudiciales tanto para el planeta como para el ser humano. Dado que las mejoras tecnológicas implementadas para reducir la emisión de gases contaminantes resultantes de los procesos que requieren combustible fósil no son suficientes para la consecución de los objetivos de los acuerdos firmados en materia del cambio climático, el uso de estos combustibles debe reducirse. Si no queremos romper el equilibrio existente, reduciendo la demanda a la vez que la oferta, se debe incrementar la instalación y uso de energías renovables, que se componen de diferentes orígenes.

La energía hidroeléctrica suministra en torno al 20% de la electricidad que se consume en el mundo, con 1096 GW instalados en todo el globo. Los países que más electricidad generan a través de esta fuente son China, Canadá, Brasil y Estados Unidos. Existen países que pueden llegar a basar su generación total en esta tecnología como Noruega, Zaire y Brasil superando el 90% de la producción total.

Existen varias clasificaciones de centrales hidroeléctricas y tipos, que otorgan flexibilidad a la hora de aprovechar las características de la zona donde se pueda construir una central. Las centrales más comunes y que más producción logran son las centrales de agua embalsada, que constan de un presa que acumula agua para permitir una producción regular a lo largo del tiempo, evitando épocas de sequía y que afecten a la producción. Otro tipo de centrales que pueden tener una mayor importancia en el futuro son las centrales de bombeo, debido a que ayudan a integrar energías renovables.

Estas centrales de bombeo constan de dos embalses, uno superior y uno inferior, y funcionan durante las horas punta como una central hidroeléctrica convencional generando electricidad a través del agua que cae procedente del embalse superior y durante las horas valle bombea agua desde el embalse inferior al superior consumiendo electricidad. Mediante esta central se puede compensar la volatilidad de las energías renovables, ya que pueden producir electricidad si éstas en un momento puntual no generan lo suficiente para cubrir la demanda y en caso contrario pueden absorber el exceso de electricidad cuanto las renovables generan de manera espontanea sin demanda pudiendo almacenar esa energía bombeando agua al embalse superior, dejándola lista para poder turbinarla.

Esta fuente de energía se considera renovable pero tiene una serie de inconvenientes que no la hacen tan atractiva como el resto. El mayor de todos es su impacto ambiental, ya que se inundan grandes extensiones de terreno que afectan a la flora y fauna de la zona. Tienen un elevado coste inicial y se suelen situar lejos de núcleos urbanos, lo que aumenta el precio del transporte de la electricidad. Debido a estos inconvenientes junto a la madurez de su tecnología, en países desarrollados existen pocas posibilidades de un aumentar el número de centrales hidroeléctricas, pero en el resto del mundo sí que existen localizaciones que podrían aprovechar esta fuente de energía.

La energía eólica es una energía que no produce ningún tipo de emisiones al medio ambiente y puede instalarse en zonas tanto urbanas como en zonas despobladas dependiendo el tamaño del aerogenerador. Su precio además es muy competitivo, siendo la más barata en algunos países como España en 2015. Estas ventajas convierten esta fuente de energía en una opción muy atractiva para que aumente su instalación en el futuro.

Los países que más potencia eólica tienen instalada son, por orden, China, Estados Unidos, Alemania, India y España. En 2015, aproximadamente el 5% de la electricidad consumida en el mundo procedía de la energía eólica. En países

Europeos como Dinamarca y España pueden llegar a superar el 20% de la electricidad consumida.

Además de su instalación en tierra tanto en grandes parques de aerogeneradores como en zonas urbanas con molinos de menor tamaño para minimizar ruidos, se han construido parques eólicos marinos. En el mar el viento es más fuerte y continuo que en tierra, aunque el coste de este tipo de instalaciones es claramente superior a un parque de la misma potencia en tierra.

Como inconvenientes podemos encontrar que no todo el viento es aprovechable, ya que existe un mínimo para que las palas comiencen a moverse y un máximo que no debe sobrepasarse para evitar que el aerogenerador sufra daños estructurales. Debido a esto último, los aerogeneradores llevan instalados un freno para evitar esta situación. También hay que tener en cuenta que existe un impacto ambiental y algunos pájaros fallecen al chocarse con las palas en funcionamiento.

La energía de biomasa aprovecha materia orgánica procedente de desechos de seres vivos o procesos industriales, usándola como combustible. En torno al 10% de la energía primaria procede de esta fuente. Es una fuente de energía utilizada sobre todo en países subdesarrollados con los peligros que ello conlleva si no es regulada, como la deforestación. Como contraste, Finlandia posee varias plantas de bioenergía que se sitúan entre las más grandes del mundo con el fin de generar electricidad.

Los países con mayor potencia instalada son Brasil con 14178 MW, Estados Unidos con 12450 MW, China cerca de 14150 MW y por detrás de ellos India y Alemania.

En 2016 la energía geotérmica tenía una potencia mundial instalada de 13.5 GW. Es una fuente de energía que permite producir electricidad todo el día. Sin embargo, los costes de exploración inicial y la posibilidad de no obtener buenos resultados impiden que esta tecnología esté más extendida.

Indonesia es la zona con mayor potencial geotérmico del mundo y por ello será una región donde más instalaciones habrá en el futuro, siendo ya el segundo país en potencia instalada, sólo por detrás de Estados Unidos.

La energía mareomotriz aprovecha el movimiento del agua del mar producido por las mareas mediante un proceso similar al de las centrales hidroeléctricas. Si bien es cierto que no produce ningún residuo el coste económico y el impacto ambiental son factores que han tenido importancia a la hora de ser una

tecnología menos utilizada que el resto de renovables. La planta más grande el mundo se encuentra en Corea del Sur con 254 MW instalados. Otra planta de tamaño considerable se encuentra en Francia, con 240 MW, y en Reino Unido existe un plan para crear lagunas artificiales y poder llegar con ello a un 10% de la producción de electricidad del país.

La energía solar es una fuente de energía que aprovecha la radiación que proviene del sol. Es una de las energías renovables con más futuro debido a la cantidad de energía que emite el Sol. Las opciones más utilizadas para aprovechar esta energía son la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica.

La energía solar térmica produce calor para los fines requeridos a través de colectores. Las aplicaciones que puede tener son el calentamiento de agua para uso sanitario e industrial y para generar electricidad mediante centrales termosolares. El funcionamiento básico de ambas consiste en concentrar la radiación recibida por el Sol para calentar el fluido con el que se trabaja. Así, si queremos calentar agua sanitaria, bastaría con un intercambiador de calor para obtener agua caliente en el circuito secundario, y si se quiere obtener vapor para generar electricidad bastaría con concentrar la suficiente energía como para producir dicho vapor.

Hasta finales de 2015, la capacidad generadora de esta tecnología se situaba en 4.9 GW. De cara al futuro los proyectos más llamativos se encuentran en África, Oriente Medio e India, lugares donde se puede aprovechar en mayor medida la radiación solar.

Por otro lado, la energía solar fotovoltaica transforma la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor la radiación en electricidad. A diferencia de la energía solar térmica, que para la obtención de electricidad está pensada para producir grandes cantidades, esta tecnología es útil para el autoconsumo. En 2016 tuvo un crecimiento mayor que cualquier otra tecnología de generación dado que sus costes cada vez son más bajos, habiendo disminuido un 70% desde 2010.

China e India son los grandes protagonistas de este aumento de instalación. En el caso de China, sus políticas apuestan por una mayor electrificación debido a los graves problemas que causa la contaminación en su país con casi 2 millones de muertes prematuras debido a ello y al cambio en su modelo económico, pasando de la producción de productos basada en combustible fósil a dar más protagonismo al sector servicios. En India existen millones de personas, sobre todo en zonas rurales, que no pueden acceder a la electricidad. Ambos son

países de grandes poblaciones y de gran poder económico, sobre todo China, y por ello pueden marcar la diferencia a la hora de reducir emisiones y aumentar la inversión en fuentes de energía limpias. Los países con mayor potencia fotovoltaica instalada son China con 77800 MW, Japón con 41000 MW, Alemania con 40600 MW y Estados Unidos con 34711 MW.

Como se ha podido comprobar, la generación de energía necesita un giro de 180 grados para no comprometer nuestro futuro. Las emisiones de CO₂ deben comenzar a reducirse desde el presente para cumplir con el Acuerdo de París y para ello debemos reemplazar un porcentaje del uso de combustibles fósiles por fuentes de energía renovable. La energía solar jugará un papel determinante en este aspecto y para ello se debe incentivar la investigación y desarrollo de la tecnología, apoyada además por políticas que favorezcan su crecimiento y fomentar el estudio de zonas que permitan obtener un máximo rendimiento del potencial de la radiación solar.

4.2. Método

4.2.1. Extracción de variables

El inicio del trabajo consiste en la extracción de variables que nos permitan obtener información de la situación actual de la energía y realizar un estudio del potencial que tiene la energía solar.

En primer lugar se procede a la obtención de la variable PVOUT mediante el uso de un software cartográfico, en nuestro caso concreto Global Solar Atlas. Este software nos muestra la irradiación normal directa recibida por la superficie terrestre del planeta. A continuación se superpone al mapamundi que muestra la irradiación una malla que nos permita obtener los valores medios del PVOUT, así como los valores mínimos y máximos, de cada país. Esta variable será útil para hacernos una idea de la cantidad de energía eléctrica que podríamos obtener de la radiación.

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

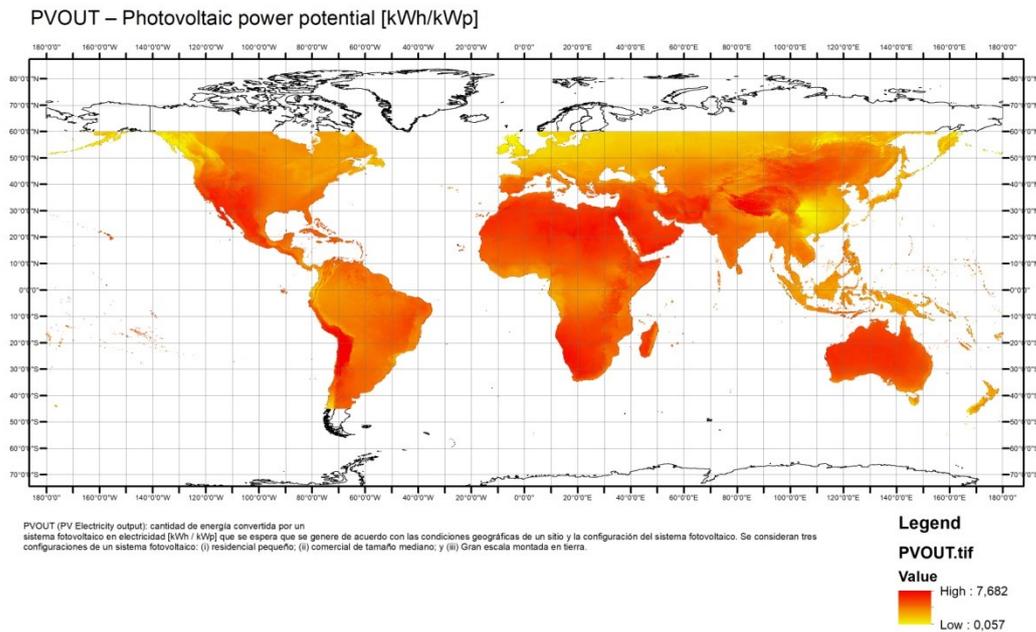


Imagen 3 PVOUT medio mundial. (Fuente: propia)

Las siguientes variables se han obtenido realizando una búsqueda en las diferentes bases de datos detalladas en la bibliografía. Estas son:

- Emisiones de CO₂ expresadas en kilotoneladas
- Consumo de energía renovable expresado en porcentaje respecto del consumo total
- Producción de electricidad de fuentes de energía renovable expresada en porcentaje respecto de la producción total
- Producción de electricidad de fuente de energía solar (fotovoltaica) expresada en porcentaje respecto de la producción total
- Población expresada en número de habitantes
- Producto interior bruto (PIB) expresado en dólares

Todas hacen referencia al año 2014, en el cual todas estas variables están completas, los años posteriores no aparecen completos en algunos casos. Todas las variables fueron extraídas del Banco Mundial, salvo la producción de electricidad de fuente de energía solar (fotovoltaica) expresada en porcentaje respecto de la producción total, extraída de la base de datos de la CIA.

4.2.2. Tratamiento de las variables

Una vez recopiladas las variables se aplica estadística descriptiva para presentar y entender mejor los datos, facilitar su análisis y poder sacar conclusiones de una manera más sencilla.

Tras un primer análisis de las variables, no se pudo llegar a la conclusión de que hubiera relación alguna entre ellas. Esto es debido a la gran diferencia existente entre países, sus diferentes niveles de desarrollo, por lo que se procedió a realizar una división en subgrupos que facilitara el análisis y se pudieran establecer relaciones.

Tras una primera división entre países desarrollados y subdesarrollados, no se encontraron las relaciones necesarias para sacar conclusiones. En una segunda división, esta vez por continentes, tampoco se obtuvieron los resultados esperados. Por lo tanto, se procedió a realizar divisiones que agruparan a los países que tuvieran características similares dentro de sus grupos.

La variable elegida en la que se basa dicha división es el PIB, ya que de todas las variables obtenidas es la que nos ofrece una visión más realista del estado de un país. El criterio elegido fue el siguiente:

Nombre del intervalo	Intervalo
Bajo	$0-25 \cdot 10^{10}$
Intermedio	$25 \cdot 10^{10}-25 \cdot 10^{11}$
Alto	$25 \cdot 10^{11}-25 \cdot 10^{12}$

Tabla 1 División de países según PIB. (Fuente: propia)

Esta división busca reflejar la diferencia entre todos los países del mundo, buscando sobre todo diferenciar aquellos que mayor PIB tienen, ya que son los motores de la economía y los que mayor influencia tienen sobre el resto del mundo.

A su vez se trató de reducir el número de países que componen el grupo "bajo" mediante más divisiones, pero no se logró encontrar diferencias significativas entre ellos, por lo que se mantuvo esta división.

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

Mediante el programa Statgraphics podemos comprobar que esta división cumple con nuestras necesidades, realizando para ello una prueba de múltiples rangos, obteniendo:

Pruebas de Múltiple Rangos para PIB por PIB_2

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>PIB_2</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Bajo	117	5,09906E10	X
Intermedio	35	8,21305E11	X
Alto	6	7,08719E12	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Alto - Bajo	*	7,0362E12	8,96647E11
Alto - Intermedio	*	6,26588E12	9,46498E11
Bajo - Intermedio	*	-7,70314E11	4,12698E11

* indica una diferencia significativa.

Imagen 4 Comprobación estadística. (Fuente: Statgraphics)

Los pares de muestras que aparecen con un asterisco muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95% de confianza. Vemos que existen diferencias significativas entre los grupos de países, que era lo que buscábamos.

Los grupos bajo esta división quedarían formados por los siguientes países:

Países del grupo "Alto"
Estados Unidos
China
Japón
Alemania
Reino Unido
Francia

Tabla 2 Países pertenecientes al grupo "Alto". (Fuente: propia)

Países del grupo "Intermedio"	
Brasil	Argentina
Italia	Noruega
Federación de Rusia	Venezuela
India	Austria
Canadá	Irán, República Islámica del
Australia	Tailandia
Corea, República de	Emiratos Árabes Unidos
España	Colombia
México	Dinamarca
Turquía	Sudáfrica
Indonesia	Malasia
Países Bajos	Israel
Arabia Saudita	Egipto, República Árabe de
Suiza	Filipinas
Suecia	Finlandia
Nigeria	Chile
Polonia	Irlanda
Bélgica	

Tabla 3 Países pertenecientes al grupo "Intermedio". (Fuente: propia)

Países del grupo "Bajo"		
Pakistán	Lituania	Benin
Grecia	Tanzanía	Guinea
Iraq	Líbano	Haití
Portugal	Túnez	Níger
Kazajstán	Yemen, Rep. del	Rwanda
Argelia	Ghana	República de Moldova
República Checa	Congo, República Democrática del	Malawi
Qatar	Jordania	Mauritania
Perú	Camerún	Suriname
Nueva Zelandia	Bahrein	Barbados
Rumania	Bolivia	Montenegro
Viet Nam	Letonia	Togo
Bangladesh	Uganda	Fiji
Kuwait	Zambia	Swazilandia
Hungría	Estonia	Maldivas
Ucrania	Trinidad y Tobago	Burundi
Angola	Chipre	Guyana
Marruecos	Papua Nueva Guinea	Lesotho
Puerto Rico	Afganistán	Bhután
Ecuador	Nepal	Cabo Verde
República Eslovaca	Honduras	Belice

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

Sudán	Bosnia y Herzegovina	República Centroafricana
Omán	Brunei Darussalam	Djibouti
Cuba	Mozambique	Santa Lucía
Sri Lanka	Camboya	Seychelles
Belarús	Botswana	Antigua y Barbuda
Azerbaiyán	Zimbabwe	Granada
Luxemburgo	Malí	Saint Kitts y Nevis
República Dominicana	Jamaica	Vanuatu
Uzbekistán	Albania	Samoa
Kenya	Mauricio	San Vicente y las Granadinas
Guatemala	Namibia	Dominica
Uruguay	Burkina Faso	Tonga
Croacia	Mongolia	Santo Tomé y Príncipe
Bulgaria	Nicaragua	Micronesia (Estados Federados de)
Etiopía	Armenia	Islas Marshall
Costa Rica	Malta	Kiribati
Eslovenia	Bahamas	Nauru
Panamá	Madagascar	Tuvalu

Tabla 4 Países pertenecientes al grupo "Bajo". (Fuente: propia)

La búsqueda de relaciones será entre aquellas variables que, por razonamiento lógico, debería existir una conexión. A continuación se describen brevemente las relaciones buscadas:

- Relación PIB – Población: Los países que mayor PIB tienen del mundo suelen contar con un gran número de habitantes, por lo que se procede a la búsqueda de su relación.
- Relación emisiones – Población: Se estudia esta relación ya que cuanto mayor población esté afectada por las emisiones, mayor interés debería existir por reducir las.
- Relación PIB – Emisiones: Los países con mayor PIB producen mayores emisiones por norma general, por lo que se estudia su relación.
- Emisiones – Energía renovable consumida: Por lógica, a mayor porcentaje de energía renovable consumida, menos emisiones.
- Electricidad de origen renovable – PVOUT: Por razonamiento lógico, a mayor potencial fotovoltaico, mayor electricidad de origen renovable debería existir.
- Electricidad mediante energía solar - Electricidad de origen renovable: Cuanto mayor sea la producción de electricidad mediante energía solar, mayor porcentaje de electricidad de origen renovable debería darse.
- PIB – Electricidad mediante energía solar: Para aprovechar la energía solar es necesaria una inversión, por lo que se estudia si los países con mayores recursos económicos han apostado por esta tecnología.
- PIB – PVOUT: Se estudia si los países más ricos son los que disponen de mayor potencial fotovoltaico.
- Población – PVOUT: Se estudia si los países que mayor irradiación reciben y son los más habitados y por lo tanto centrar el interés en reducir sus emisiones mediante el aprovechamiento de energía solar.
- PVOUT - Electricidad mediante energía solar: Se busca la relación entre la capacidad de producción de electricidad mediante energía solar y la producida en realidad.
- Emisiones - Electricidad de origen renovable: Por lógica, a mayor porcentaje de electricidad renovable producida, menos emisiones.

Una vez hecha esta división y su justificación, se procede a la búsqueda de relaciones entre las variables elegidas.

Correlaciones dentro del grupo "Alto"

Mediante la opción de regresión simple de un factor que nos ofrece Statgraphics buscaremos las relaciones entre variables. El programa nos preguntará qué variables queremos relacionar, situando cada una en un eje. En el eje de abscisas debemos situar la variable independiente, mientras que en el eje de ordenadas

la variable dependiente. Para la relación entre PIB y población, la variable dependiente será el PIB y la independiente la población. A continuación se selecciona como tipo de modelo un modelo lineal. En todas las relaciones se seleccionará este tipo de modelo de manera inicial. El programa nos muestra las siguientes ventanas:

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	5,33137E12	2,89626E12	1,84078	0,1395
Pendiente	5210,05	5023,95	1,03704	0,3583

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	3,56302E25	1	3,56302E25	1,08	0,3583
Residuo	1,32521E26	4	3,31303E25		
Total (Corr.)	1,68152E26	5			

Coefficiente de Correlación = 0,460319
 R-cuadrada = 21,1894 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 1,48669 por ciento
 Error estándar del est. = 5,7559E12
 Error absoluto medio = 3,47884E12
 Estadístico Durbin-Watson = 1,17279 (P=0,0871)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,0275172

Imagen 5 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

En la primera imagen podemos ver un resumen acerca de la relación. El coeficiente de correlación nos indica que existe una relación directa moderada, con un valor de 0,46. El estadístico Durbon-Watson nos indica la dependencia de errores consecutivos. Este valor se sitúa entre 0 y 4, cuanto más cercano a 2 sea el valor, mayor independencia tendrá. Como nuestro valor es 1,17 podemos afirmar que los errores son independientes. El valor P que aparece a continuación es mayor que 0,05, por lo que esta afirmación tiene un nivel de confianza del 95%. Esto aporta confianza a la muestra elegida, ya que si no fueran independientes podrían obtenerse conclusiones erróneas.

El valor-P del modelo es 0,3583, mayor que 0,05, por lo que no hay una relación estadísticamente significativa entre PIB y población con un nivel de confianza del 95% mínimo. Además el valor R-cuadrada indica que el modelo lineal sólo se ajusta un 21,18%. Esto puede verse gráficamente en la segunda gráfica:

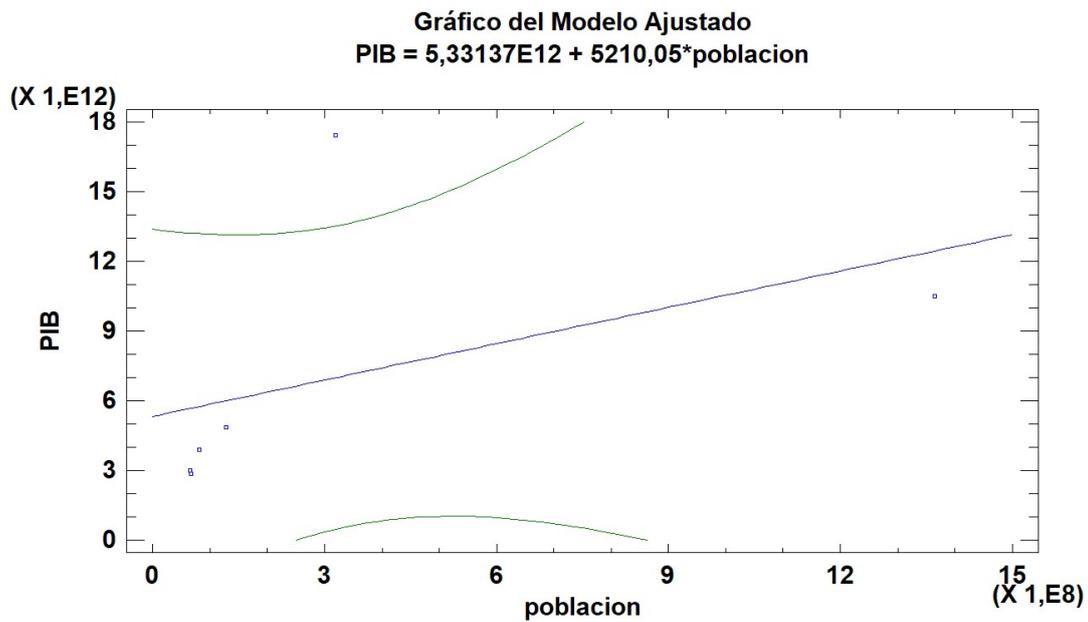


Imagen 6 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Puede observarse cómo hay un punto que está fuera del intervalo de confianza (líneas verdes). El resto de puntos no están tan alejados del ajuste lineal. Ante esta situación se debe cambiar el ajuste por uno mejor. Para ello mediante Statgraphics crearemos una tabla de comparación de modelos donde podamos ver cuál se ajusta más, resultando en nuestro caso que el mejor modelo es el doble inverso:

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Doble Inverso	0,9677	93,64%
Curva S	-0,9218	84,97%
Raiz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,8775	77,00%
Inversa-Y Log-X	-0,8522	72,62%
Inversa de X	-0,8243	67,95%
Multiplicativa	0,8132	66,13%
Raiz Cuadrada-Y Log-X	0,7657	58,64%
Inversa-Y Raiz Cuadrada-X	-0,7400	54,77%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,7147	51,07%
Logaritmo de X	0,7053	49,74%
Logaritmico-Y Raiz Cuadrada-X	0,6957	48,39%
Raiz Cuadrada Doble	0,6437	41,44%
Inversa de Y	-0,6376	40,65%
Exponencial	0,5860	34,33%
Raiz Cuadrada de X	0,5780	33,41%
Cuadrado-Y Log-X	0,5746	33,02%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,5301	28,10%
Raiz Cuadrada de Y	0,5300	28,09%
Log-Y Cuadrado-X	0,4686	21,96%
Lineal	0,4603	21,19%
Cuadrado-Y Raiz Cuadrada-X	0,4369	19,09%
Raiz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,4081	16,65%
Cuadrado de X	0,3346	11,20%
Cuadrado de Y	0,3127	9,78%
Cuadrado Doble	0,1819	3,31%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

Imagen 7 Comparación de modelos. (Fuente: Statgraphics)

Una vez sabido cuál es el modelo que mejor ajuste tiene, volvemos a realizar la relación mediante regresión simple, eligiendo esta vez el modelo doble inverso. En la siguiente tabla resumen podemos ver que la correlación es mucho mayor, pero el programa no ofrece datos de confianza, por lo que no podemos afirmar que haya significancia estadística. Debido a esta falta de información en modelos diferentes al lineal, se optará por buscar siempre relaciones lineales que estén complementadas por estadísticos.

Coefficientes

Parámetro	Mínimos Cuadrados Estimado	Estándar Error	Estadístico T	Valor-P
Intercepto	0	0		
Pendiente	0,0000187556	0		

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0	1	0		
Residuo	0	4	0		
Total (Corr.)	0	5			

Coefficiente de Correlación = 0,967675
R-cuadrada = 93,6396 por ciento
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 92,0494 por ciento
Error estándar del est. = 0
Error absoluto medio = 0
Estadístico Durbin-Watson = 2,05864 (P=0,2895)
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,323279

Imagen 8 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

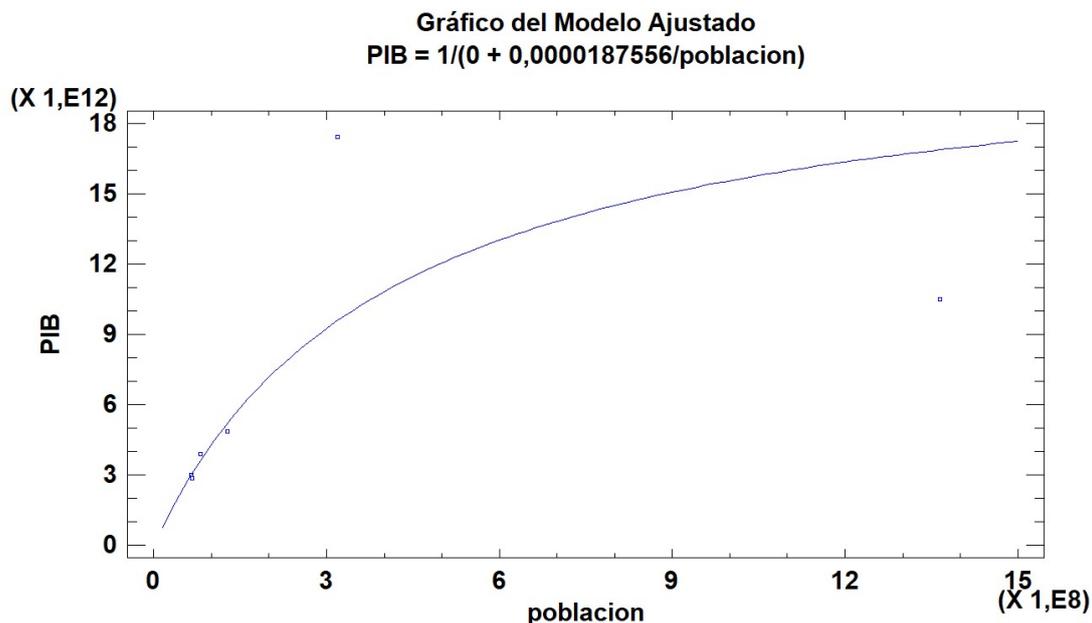


Imagen 9 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Para resolver este problema, se opta por excluir al país que estaba fuera del intervalo de confianza en el modelo lineal, y repetir dicho modelo sin él (Estados Unidos).

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	3,1841E12	4,1322E11	7,70558	0,0045
Pendiente	5386,07	671,647	8,0192	0,0040

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	3,80666E25	1	3,80666E25	64,31	0,0040
Residuo	1,77584E24	3	5,91946E23		
Total (Corr.)	3,98424E25	4			

Coefficiente de Correlación = 0,97746
R-cuadrada = 95,5428 por ciento
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 94,0571 por ciento
Error estándar del est. = 7,6938E11
Error absoluto medio = 5,0045E11
Estadístico Durbin-Watson = 1,24339 (P=0,0688)
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,242757

Imagen 10 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

En este primer resumen se puede ver cómo la correlación ha aumentado en gran medida respecto al primer modelo lineal, siendo igual a 0,97746, una correlación muy alta. Además el valor-P de la tabla ANOVA es menor que 0,05, por lo que

existe una relación estadísticamente significativa entre el PIB y la población de los países analizados con un nivel de confianza del 95%.

El estadístico Durbin-Watson muestra un valor de 1,1, por lo que podemos afirmar que los errores son independientes. El valor P que aparece a continuación es mayor que 0,05, por lo que esta afirmación tiene un nivel de confianza del 95%.

El valor R-cuadrada indica que el modelo lineal se ajusta un 95,54 %, un valor muy alto y que nos indica que el modelo se ajusta bien a la muestra estudiada. En la siguiente tabla se muestran los distintos modelos y cómo se ajustan:

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado-Y Raiz Cuadrada-X	0,9991	99,81%
Logaritmo de X	0,9978	99,57%
Cuadrado-Y Log-X	0,9972	99,44%
Cuadrado de Y	0,9951	99,02%
Raiz Cuadrada-Y Log-X	0,9910	98,20%
Cuadrado Doble	0,9907	98,16%
Curva S	-0,9898	97,97%
Raiz Cuadrada de X	0,9879	97,59%
Doble Inverso	0,9854	97,10%
Raiz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,9796	95,96%
Lineal	0,9775	95,54%
Multiplicativa	0,9762	95,29%
Raiz Cuadrada Doble	0,9734	94,75%
Cuadrado de X	0,9691	93,91%
Inversa de X	-0,9642	92,97%
Raiz Cuadrada de Y	0,9588	91,93%
Logaritmico-Y Raiz Cuadrada-X	0,9502	90,29%
Raiz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,9479	89,85%
Exponencial	0,9311	86,69%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,9301	86,51%
Inversa-Y Log-X	-0,9199	84,63%
Log-Y Cuadrado-X	0,9174	84,16%
Inversa-Y Raiz Cuadrada-X	-0,8771	76,94%
Inversa de Y	-0,8492	72,12%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,8302	68,92%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

Imagen 11 Comparación de modelos. (Fuente: Statgraphics)

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

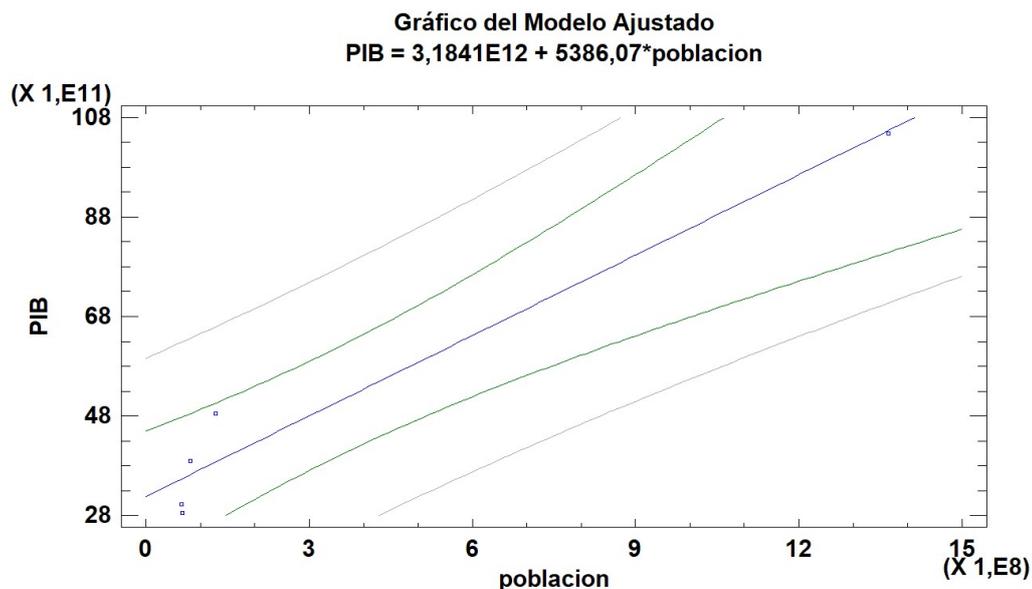


Imagen 12 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Por último, en la anterior gráfica se muestra visualmente los datos estadísticos que indican la relación entre las variables. Todos los puntos están dentro del intervalo de confianza.

Podemos concluir por lo tanto que existe una fuerte relación directa entre población y PIB de un país dentro del grupo de países con un PIB muy alto con la excepción de Estados Unidos.

La siguiente relación será entre las emisiones de CO₂ y la población, siendo la variable independiente la población y la dependiente el CO₂. Comenzaremos teniendo en cuenta todos los países que forman este grupo:

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	507434,	655866,	0,773686	0,4823
Pendiente	0,00749671	0,00113769	6,58943	0,0027

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	7,37695E13	1	7,37695E13	43,42	0,0027
Residuo	6,79581E12	4	1,69895E12		
Total (Corr.)	8,05653E13	5			

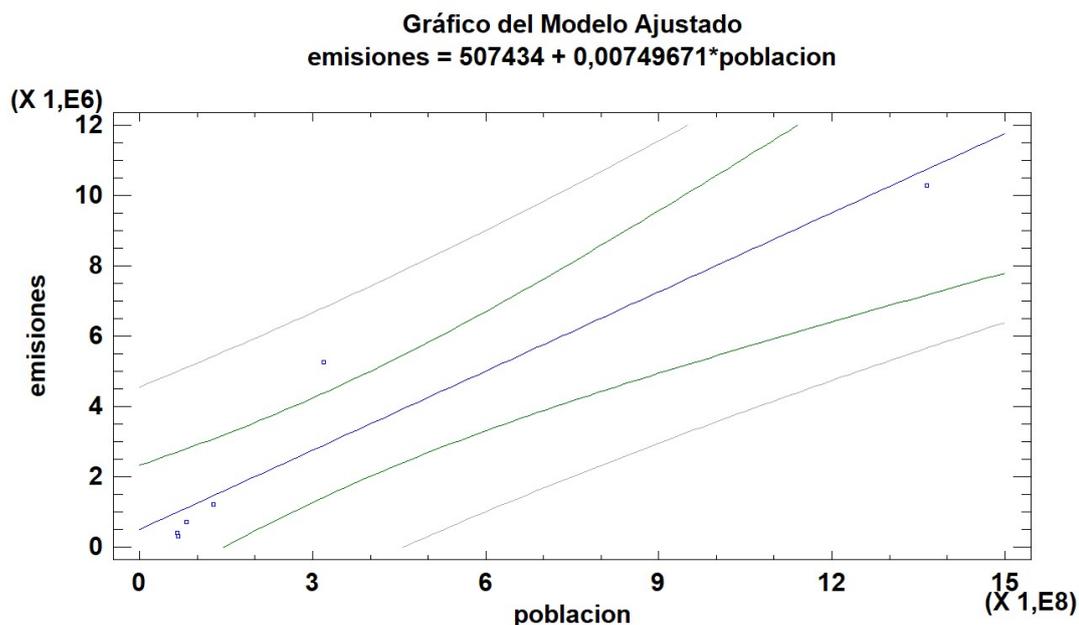
Coefficiente de Correlación = 0,956895
 R-cuadrada = 91,5648 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 89,456 por ciento
 Error estándar del est. = 1,30344E6
 Error absoluto medio = 786222,
 Estadístico Durbin-Watson = 1,17097 (P=0,0865)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,0310006

Imagen 13 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

El coeficiente de correlación es 0,956, un valor elevado. Además el valor-P de la tabla ANOVA es menor que 0,05, por lo que existe una relación estadísticamente significativa entre las emisiones de CO₂ y la población de los países analizados con un nivel de confianza del 95%.

El estadístico Durbin-Watson muestra un valor de 1,1, por lo que podemos afirmar que los errores son independientes. El valor P que aparece a continuación es mayor que 0,05, por lo que esta afirmación tiene un nivel de confianza del 95%.

El valor R-cuadrada indica que el modelo lineal se ajusta un 91,56 %, un valor muy alto y que nos indica que el modelo se ajusta bien a la muestra estudiada.



Por último, en la anterior gráfica se muestra visualmente los datos estadísticos que indican la relación entre las variables. Todos los puntos están dentro del intervalo de confianza salvo uno, este se encuentra dentro del intervalo de predicción. Al ser un modelo que demuestra un gran ajuste a la muestra y el valor que se encuentra fuera del intervalo de confianza se encuentra dentro del intervalo de predicción, no se opta por repetir el análisis eliminando dicho dato. La conclusión es que existe una gran relación directa entre las emisiones y la población de un país dentro del grupo de países con un PIB muy alto.

A continuación se estudiará la relación entre PIB y emisiones de CO₂, siendo la variable dependiente las emisiones y el PIB la variable independiente.

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	-391304	2,19177E6	-0,178534	0,8670
Pendiente	4,83291E-7	2,47766E-7	1,95059	0,1229

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	3,92752E13	1	3,92752E13	3,80	0,1229
Residuo	4,12901E13	4	1,03225E13		
Total (Corr.)	8,05653E13	5			

Coefficiente de Correlación = 0,698209
 R-cuadrada = 48,7496 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 35,9369 por ciento
 Error estándar del est. = 3,21287E6
 Error absoluto medio = 1,8724E6
 Estadístico Durbin-Watson = 2,68534 (P=0,6618)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,441697

Imagen 15 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

En este caso no hay una relación estadísticamente significativa, por lo que se busca en el gráfico del modelo ajustado el dato que está fuera del intervalo de confianza (China):

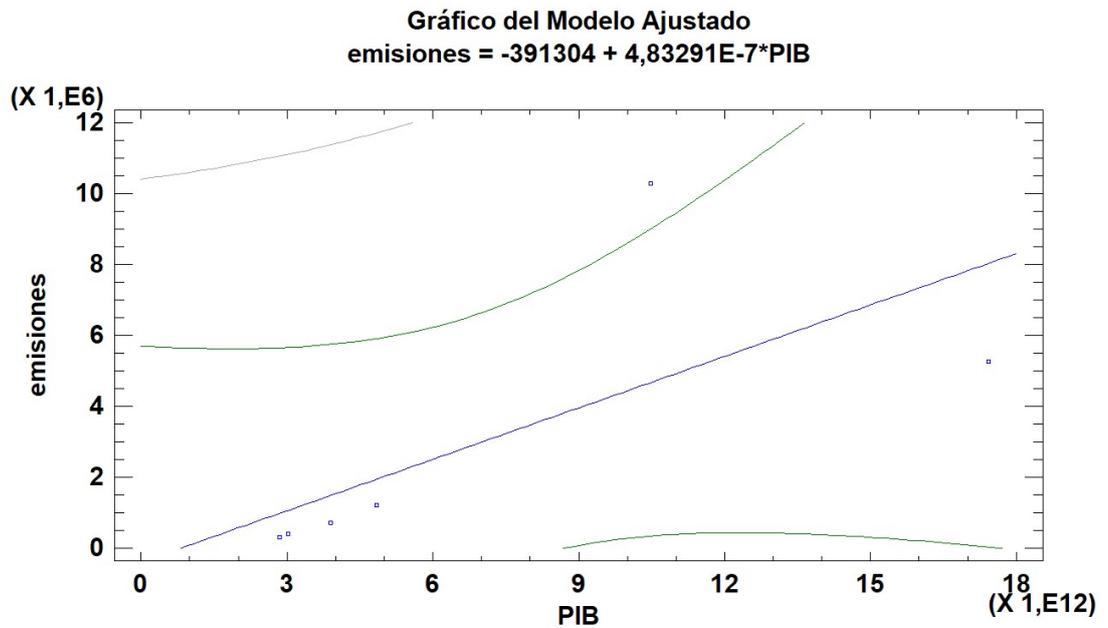


Imagen 16 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Los nuevos datos estadísticos serán:

Coefficientes

Parámetro	Mínimos Cuadrados Estimado	Estándar Error	Estadístico T	Valor-P
Intercepto	-564405,	71252,4	-7,92122	0,0042
Pendiente	3,3499E-7	8,40136E-9	39,8733	0,0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1,73174E13	1	1,73174E13	1589,88	0,0000
Residuo	3,26768E10	3	1,08923E10		
Total (Corr.)	1,73501E13	4			

Coefficiente de Correlación = 0,999058
 R-cuadrada = 99,8117 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99,7489 por ciento
 Error estándar del est. = 104366,
 Error absoluto medio = 61445,5
 Estadístico Durbin-Watson = 1,93515 (P=0,2801)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,0886332

Imagen 17 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

Ahora la correlación es mucho más alta, 0,999. Además el valor-P de la tabla ANOVA es menor que 0,05, por lo que existe una relación estadísticamente significativa entre las emisiones de CO₂ y el PIB de los países analizados con un nivel de confianza del 95%.

El estadístico Durbin-Watson muestra un valor de 1,9, por lo que podemos afirmar que los errores son independientes. El valor P que aparece a continuación es mayor que 0,05, por lo que esta afirmación tiene un nivel de confianza del 95%.

El valor R-cuadrada indica que el modelo lineal se ajusta un 99,81 %, un valor muy alto y que nos indica que el modelo se ajusta bien a la muestra estudiada.

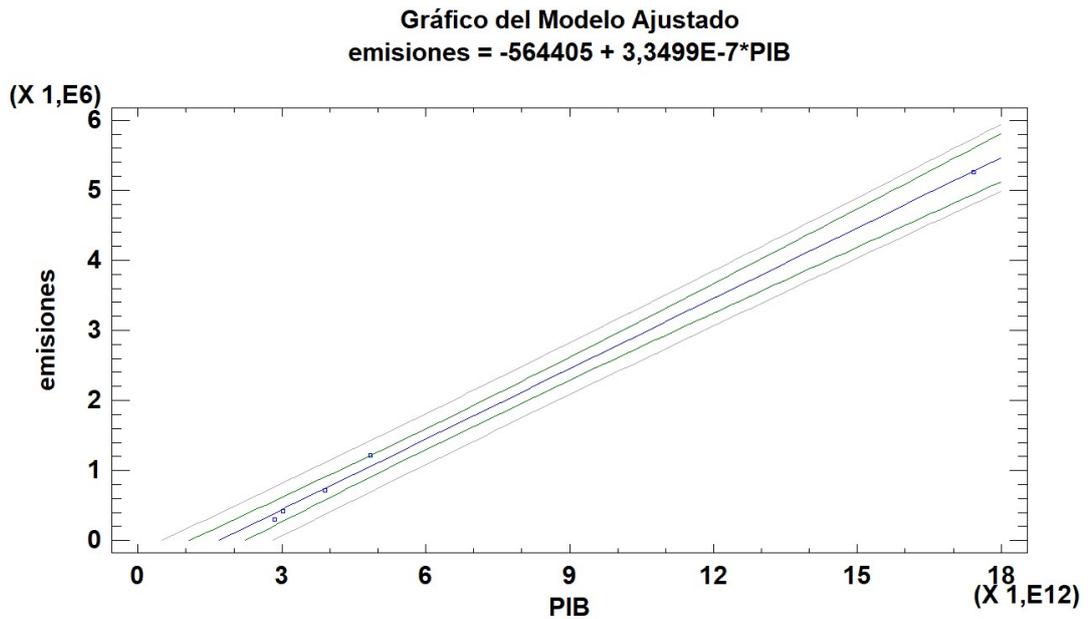


Imagen 18 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Por último, en la anterior gráfica se muestra visualmente los datos estadísticos que indican la relación entre las variables. Todos los puntos están dentro del intervalo de confianza.

Podemos concluir por lo tanto que existe una fuerte relación directa entre población y PIB de un país dentro del grupo de países con un PIB muy alto.

La siguiente relación será entre las variables porcentaje de electricidad producido mediante energías renovables y el porcentaje de electricidad generada por energía solar fotovoltaica. El porcentaje de electricidad producido será la variable dependiente:

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	15,8389	2,71252	5,83919	0,0043
Pendiente	1,37872	0,966955	1,42583	0,2271

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	44,1655	1	44,1655	2,03	0,2271
Residuo	86,8972	4	21,7243		
Total (Corr.)	131,063	5			

Coefficiente de Correlación = 0,5805
R-cuadrada = 33,698 por ciento
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 17,1225 por ciento
Error estándar del est. = 4,66093
Error absoluto medio = 3,2816
Estadístico Durbin-Watson = 3,29422 (P=0,9708)
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,727863

Imagen 19 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

Como se puede observar en la tabla resumen anterior, existe una relación moderada según el coeficiente de correlación. Sin embargo, el valor-P de la tabla ANOVA es mayor que 0,05, lo que nos dice que no hay relación estadísticamente significativa entre el porcentaje de producción de electricidad a través de renovables y el porcentaje de producción de electricidad mediante energía solar fotovoltaica con un nivel de confianza del 95%.

El estadístico Durbin-Watson muestra un valor de 3,2, por lo que podemos afirmar que los errores son independientes. El valor P que aparece a continuación es mayor que 0,05, por lo que esta afirmación tiene un nivel de confianza del 95%. El valor R-cuadrada indica que el modelo lineal se ajusta un 33,6.

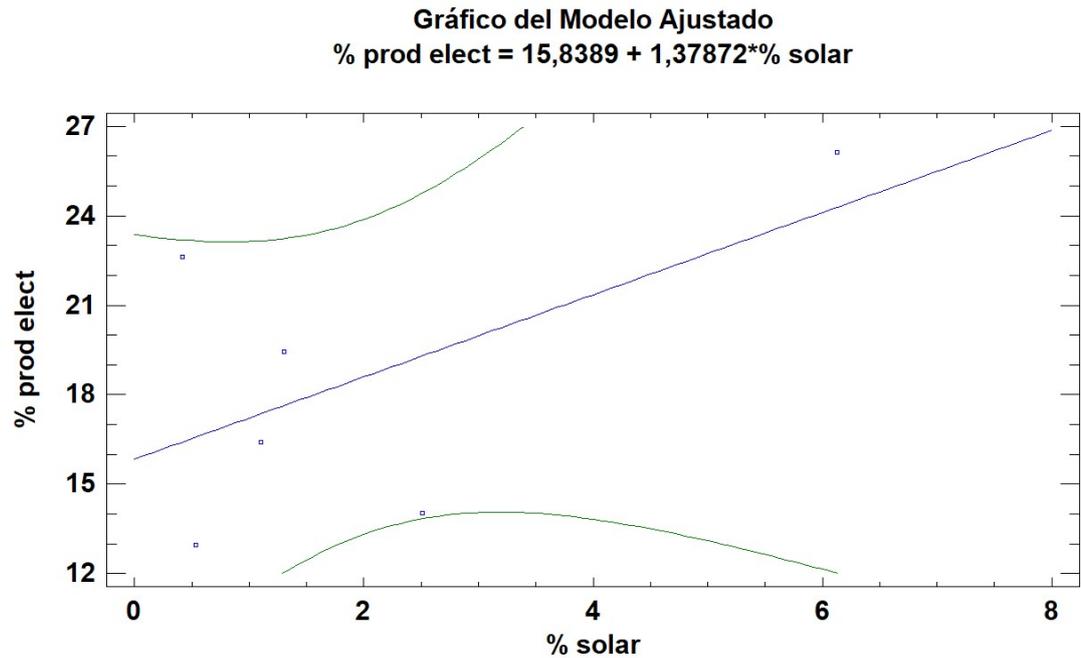


Imagen 20 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

En la anterior gráfica se muestra visualmente los datos estadísticos que indican la relación entre las variables. Todos los puntos están dentro del intervalo de confianza.

Teniendo en cuenta todos los datos estadísticos y gráficos, se concluye que existe una relación moderada entre las variables, pero que estadísticamente no ofrece confianza.

Los siguientes datos estadísticos buscan explicar la relación entre las variables PIB y porcentaje de producción de electricidad de origen solar, siendo la variable independiente el PIB:

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	3,18863	1,46703	2,17353	0,0954
Pendiente	0	0	-1,01199	0,3688

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	4,73615	1	4,73615	1,02	0,3688
Residuo	18,4984	4	4,62459		
Total (Corr.)	23,2345	5			

Coefficiente de Correlación = -0,451488
R-cuadrada = 20,3841 por ciento
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0,480167 por ciento
Error estándar del est. = 2,15049
Error absoluto medio = 1,33297
Estadístico Durbin-Watson = 2,1438 (P=0,3506)
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,143749

Imagen 21 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

Existe un relación inversa entre las variables según el coeficiente de correlación, -0,45. El valor-P de la tabla ANOVA es mayor que 0,05 por lo que no hay relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95%.

El estadístico Durbin-Watson muestra un valor de 2,1, por lo que podemos afirmar que los errores son independientes. El valor P que aparece a continuación es mayor que 0,05, por lo que esta afirmación tiene un nivel de confianza del 95%.

El valor R-cuadrada indica que el modelo lineal se ajusta un 20,3 %.

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

Gráfico del Modelo Ajustado
 $\% \text{ solar} = 3,18863 - 0 \cdot \text{PIB}$

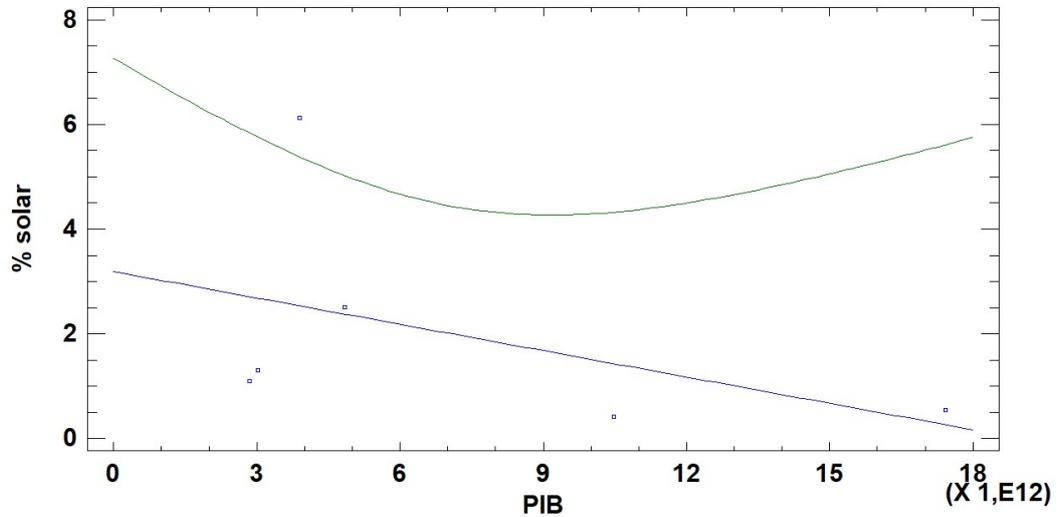


Imagen 22 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Visualmente los datos indican que efectivamente hay una relación inversa entre las variables. Sin embargo existe un dato (Alemania) que se encuentra fuera del intervalo de confianza. Se puede concluir que existe relación inversa entre las variables con un bajo nivel de confianza.

Proseguiremos con el estudio de relación entre las variables PIB y PVOUT, siendo PVOUT la variable independiente:

Coefficientes

Parámetro	Mínimos Cuadrados Estimado	Estándar Error	Estadístico T	Valor-P
Intercepto	-1,83445E13	8,35551E12	-2,1955	0,0931
Pendiente	7,55391E12	2,44476E12	3,08983	0,0366

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1,18502E26	1	1,18502E26	9,55	0,0366
Residuo	4,96496E25	4	1,24124E25		
Total (Corr.)	1,68152E26	5			

Coefficiente de Correlación = 0,839484
 R-cuadrada = 70,4733 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 63,0916 por ciento
 Error estándar del est. = 3,52312E12
 Error absoluto medio = 2,52766E12
 Estadístico Durbin-Watson = 1,81161 (P=0,2277)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,279919

Imagen 23 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

En este caso el coeficiente de correlación es alto, 0,83. El valor-P de la tabla ANOVA es menor que 0,05 por lo que hay relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95%.

El estadístico Durbin-Watson muestra un valor de 1,8, por lo que podemos afirmar que los errores son independientes. El valor P que aparece a continuación es mayor que 0,05, por lo que esta afirmación tiene un nivel de confianza del 95%.

El valor R-cuadrada indica que el modelo lineal se ajusta un 70,4 %.

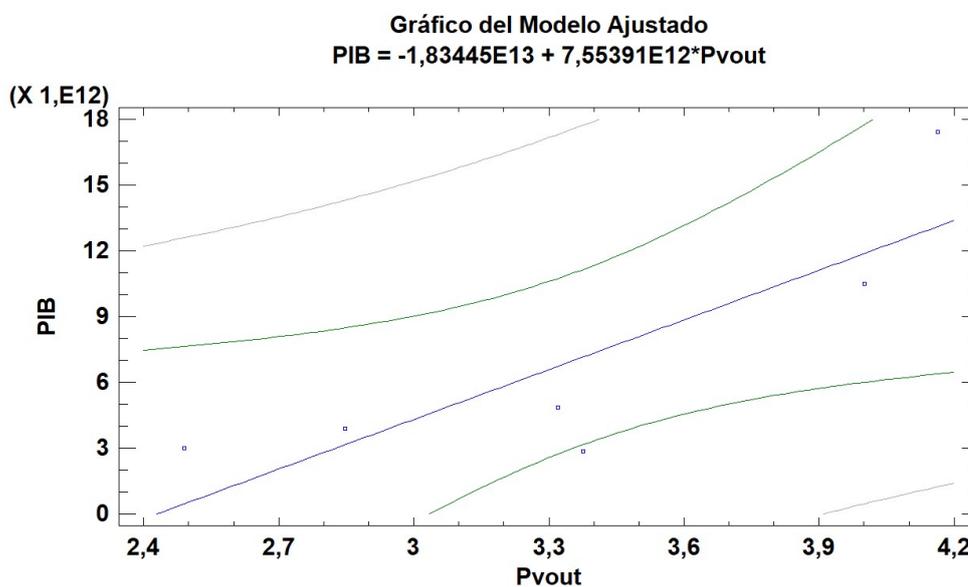


Imagen 24 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

En el gráfico anterior se observa que salvo un dato los demás se encuentran dentro del intervalo de confianza. Este dato se encuentra cerca del intervalo y confianza y además está dentro del intervalo de predicción.

Por lo que se acaba de ver, las variables PIB y PVOUT están relacionadas directamente.

Las siguientes variables de estudio serán población y PVOUT:

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	-1,31009E9	1,07087E9	-1,22339	0,2883
Pendiente	4,89233E8	3,1333E8	1,5614	0,1935

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	4,97066E17	1	4,97066E17	2,44	0,1935
Residuo	8,15543E17	4	2,03886E17		
Total (Corr.)	1,31261E18	5			

Coefficiente de Correlación = 0,615374
 R-cuadrada = 37,8685 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 22,3357 por ciento
 Error estándar del est. = 4,51537E8
 Error absoluto medio = 2,90884E8
 Estadístico Durbin-Watson = 2,85368 (P=0,7904)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,575638

Imagen 25 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

Tanto en el resumen estadístico como visualmente podemos ver existe una relación directa entre las variables, pero que existe un dato que afecta a la relación.

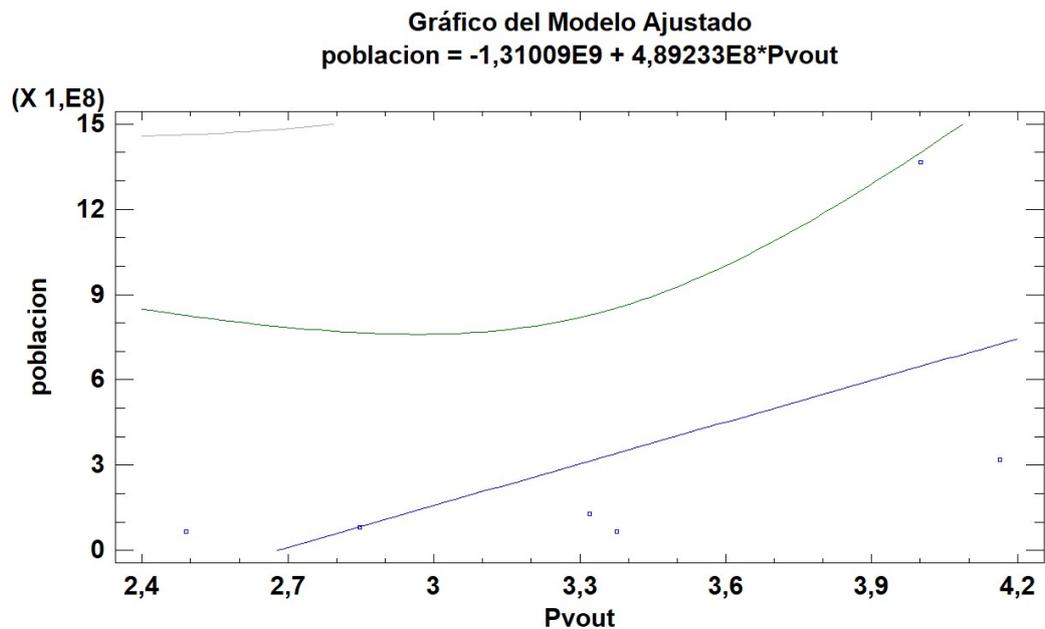


Imagen 26 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Sin tener en cuenta ese país (China), la relación mejora:

Coefficientes

Parámetro	Mínimos Cuadrados Estimado	Estándar Error	Estadístico T	Valor-P
Intercepto	-3,43481E8	1,64959E8	-2,08222	0,1287
Pendiente	1,46626E8	5,01613E7	2,9231	0,0613

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	3,42559E16	1	3,42559E16	8,54	0,0613
Residuo	1,20274E16	3	4,00912E15		
Total (Corr.)	4,62833E16	4			

Coefficiente de Correlación = 0,860312
 R-cuadrada = 74,0136 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 65,3515 por ciento
 Error estándar del est. = 6,33176E7
 Error absoluto medio = 4,04314E7
 Estadístico Durbin-Watson = 1,88918 (P=0,2974)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,355904

Imagen 27 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

El coeficiente pasa a 0,86 y el modelo se ajusta mucho mejor, siendo el estadístico R-cuadrada un 74%. El valor-P es mayor que 0,05, pero no dista mucho de este valor (0,06). Además no hay relación entre errores como nos indica el estadístico Durbin-Watson, por lo que a través del modelo lineal no llegaremos a conclusiones erróneas.

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

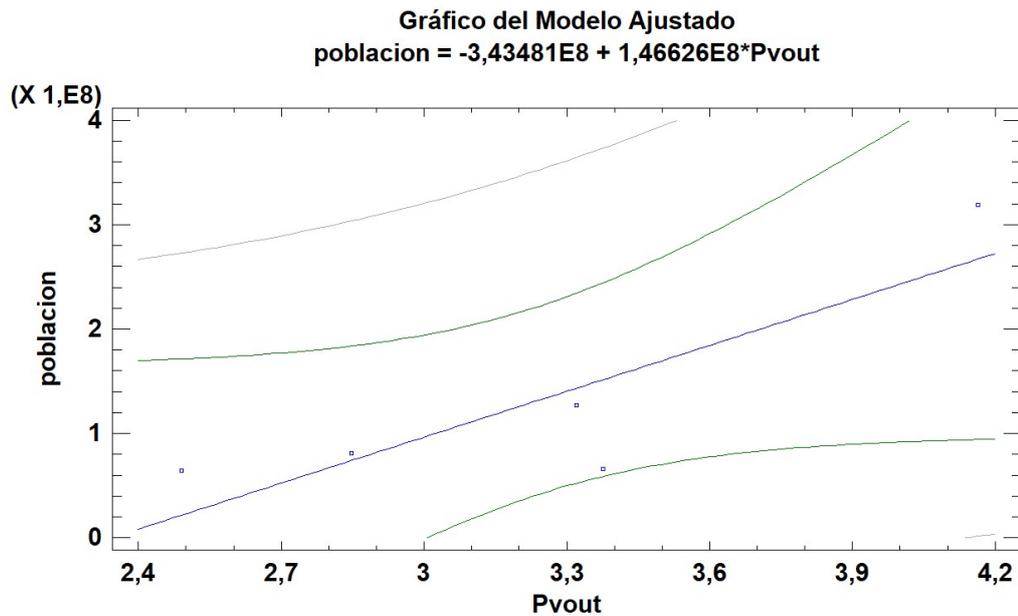


Imagen 28 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

En este nuevo gráfico se aprecian ambos intervalos de confianza y todas las muestras se encuentran dentro.

Existe por lo tanto una relación directa entre las variables PVOUT y población con la excepción de China.

Los siguientes estadísticos muestran la relación entre el porcentaje de electricidad generado por energía solar y PVOUT.

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	8,05618	4,81864	1,67188	0,1699
Pendiente	-1,79908	1,4099	-1,27604	0,2710

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	6,72178	1	6,72178	1,63	0,2710
Residuo	16,5127	4	4,12818		
Total (Corr.)	23,2345	5			

Coefficiente de Correlación = -0,537868
R-cuadrada = 28,9301 por ciento
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 11,1627 por ciento
Error estándar del est. = 2,03179
Error absoluto medio = 1,2068
Estadístico Durbin-Watson = 2,44608 (P=0,5686)
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,246524

Imagen 29 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

El coeficiente de correlación es $-0,53$, por lo que indica que hay una relación inversa. El estadístico R-cuadrado no indica que el modelo lineal se ajuste a la muestra con un valor igual al $28,9\%$. Durbin-Watson refleja que no hay correlación entre los residuos.

La tabla ANOVA por su parte muestra que el valor-P es mayor que $0,05$, por lo que no hay relación estadísticamente significativa entre los errores.

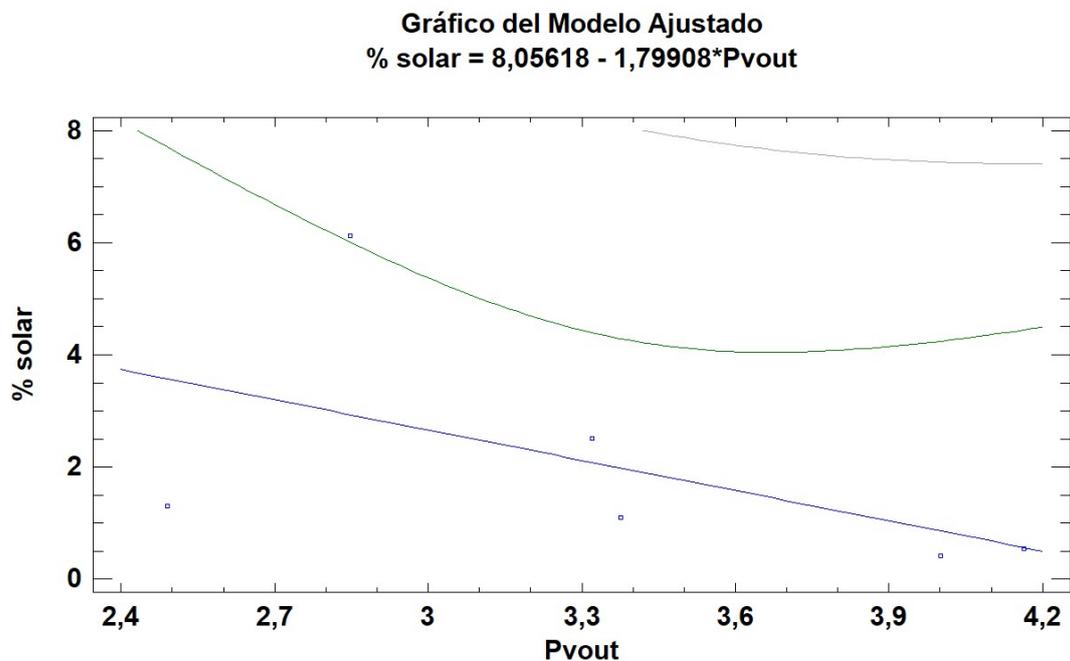


Imagen 30 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

En el gráfico anterior se observa como sólo un país se encuentra fuera del intervalo de confianza (Alemania). Este modelo no mejora aunque se elimine esa muestra, por lo que la relación inversa entre estas variables existe pero no ofrece un elevado nivel de confianza.

Correlaciones dentro del grupo "Intermedio"

Relación entre PIB y población:

Coefficientes

	Minimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	7,06227E11	1,06499E11	6,6313	0,0000
Pendiente	1252,62	456,359	2,74481	0,0097

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2,52729E24	1	2,52729E24	7,53	0,0097
Residuo	1,10699E25	33	3,35451E23		
Total (Corr.)	1,35972E25	34			

Coefficiente de Correlación = 0,431125
 R-cuadrada = 18,5869 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 16,1198 por ciento
 Error estándar del est. = 5,79181E11
 Error absoluto medio = 4,4566E11
 Estadístico Durbin-Watson = 0,411786 (P=0,0000)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,68399

Imagen 31 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

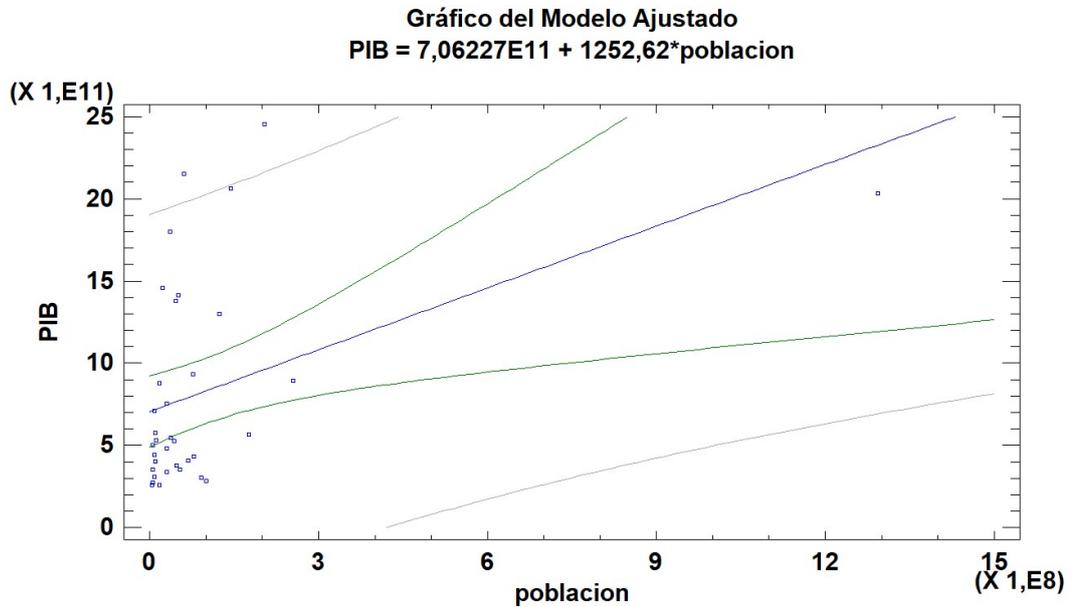


Imagen 32 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

El estadístico Durbin-Watson nos indica que hay una posible correlación entre los errores, por lo que nos obligamos a observar detenidamente el gráfico para ver qué países son los que desvirtúan el análisis.

Se observan varios países fuera del intervalo de predicción. Sin embargo, en esta ocasión no es posible ajustar mejor el análisis quitando esos países. La solución será utilizar la opción "Comparación de líneas de regresión" de Statgraphics, utilizando como filtro los continentes a los que pertenecen los países, resultando lo siguiente:

Análisis de Regresión Múltiple

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	1,93245E11	6,3383E11	0,304884	0,7630
poblacion	2001,78	5325,25	0,375903	0,7102
continente_1=america	1,34845E11	6,89313E11	0,195622	0,8465
continente_1=asia	6,35601E11	6,60999E11	0,961577	0,3455
continente_1=europa	5,95515E10	6,62654E11	0,0898681	0,9291
continente_1=oceania	4,68236E11	7,09291E11	0,660147	0,5152
poblacion*continente_1=america	7747,6	6034,48	1,28389	0,2110
poblacion*continente_1=asia	-987,419	5340,68	-0,184886	0,8548
poblacion*continente_1=europa	23192,0	9167,16	2,5299	0,0181
poblacion*continente_1=oceania	-1850,57	5881,74	-0,31463	0,7557

Coefficients

continente_1	Intercepto	Pendiente
africa	1,93245E11	2001,78
america	3,2809E11	9749,38
asia	8,28846E11	1014,36
europa	2,52796E11	25193,8
oceania	6,61481E11	151,207

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	8,0331E24	9	8,92567E23	4,01	0,0028
Residuo	5,56406E24	25	2,22562E23		
Total (Corr.)	1,35972E25	34			

R-Cuadrada = 59,0793 por ciento
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 44,3478 por ciento
Error estándar del est. = 4,71765E11
Error medio absoluto = 2,84506E11
Estadístico Durbin-Watson = 1,18474 (P=0,0071)
Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,404837

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	35	
CME	2,22562E23	
MAE	2,84506E11	
MAPE	46,2979	
ME	0,000204032	
MPE	-25,3079	

Imagen 33 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

El estadístico R-cuadrado explica el 59% de la variabilidad. El valor-P del estadístico Durbin-Watson es menor que 0,05 lo que indica que hay correlación

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

de errores con una confianza del 95%. Sin embargo, al estar el estadístico por encima de 1 (1,18), tomaremos las conclusiones con precaución, sin modificar el modelo.

ANOVA Adicional para Variables Según el Orden de Introducción

Fuente	Suma de Cuadrados	Gf	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
poblacion	2,52729E24	1	2,52729E24	11,36	0,0024
Interceptos	1,09625E24	4	2,74062E23	1,23	0,3229
Pendientes	4,40957E24	4	1,10239E24	4,95	0,0044
Modelo	8,0331E24	9			

Imagen 34 Tabla ANOVA. (Fuente: Statgraphics)

La tabla ANOVA justifica la decisión de realizar regresiones por continentes. El valor-P es menor que 0,01 (0,0024), por lo que existen diferencias estadísticas entre las pendientes de los distintos grupos de continentes con un nivel de confianza del 99%. Este estadístico puede observarse claramente en el siguiente gráfico:

Gráfica del Modelo Ajustado

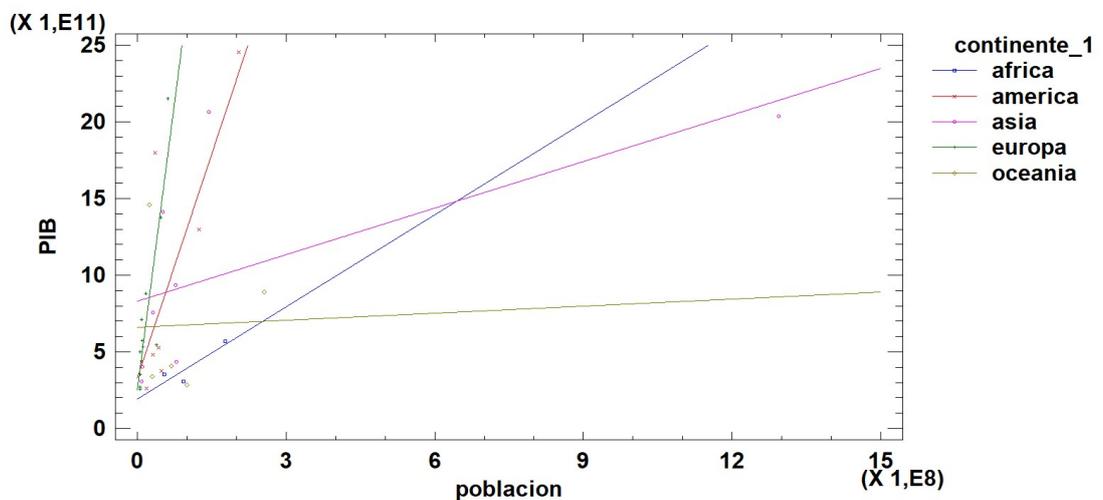


Imagen 35 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Por lo tanto, existen grandes diferencias entre países de diferentes continentes y por ello deben estudiarse de manera separada. Todos ellos muestran una correlación directa entre la población y el PIB, aunque es una relación con un nivel de confianza bajo. Sólo en Europa existe una relación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95%.

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

A continuación se estudia la relación entre emisiones y población:

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	197986,	52146,5	3,79672	0,0006
Pendiente	0,00163456	0,000223453	7,31501	0,0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	4,30345E12	1	4,30345E12	53,51	0,0000
Residuo	2,654E12	33	8,04244E10		
Total (Corr.)	6,95746E12	34			

Coefficiente de Correlación = 0,786472
 R-cuadrada = 61,8538 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 60,6979 por ciento
 Error estándar del est. = 283592,
 Error absoluto medio = 172589,
 Estadístico Durbin-Watson = 1,90209 (P=0,3826)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,0434136

Imagen 36 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

El coeficiente de correlación es elevado, 0,78, y el estadístico R-cuadrada es igual al 61,8%. El valor-P de la tabla ANOVA es menor de 0,05, por lo que hay relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95%. El estadístico Durbin-Watson no muestra relación entre errores.

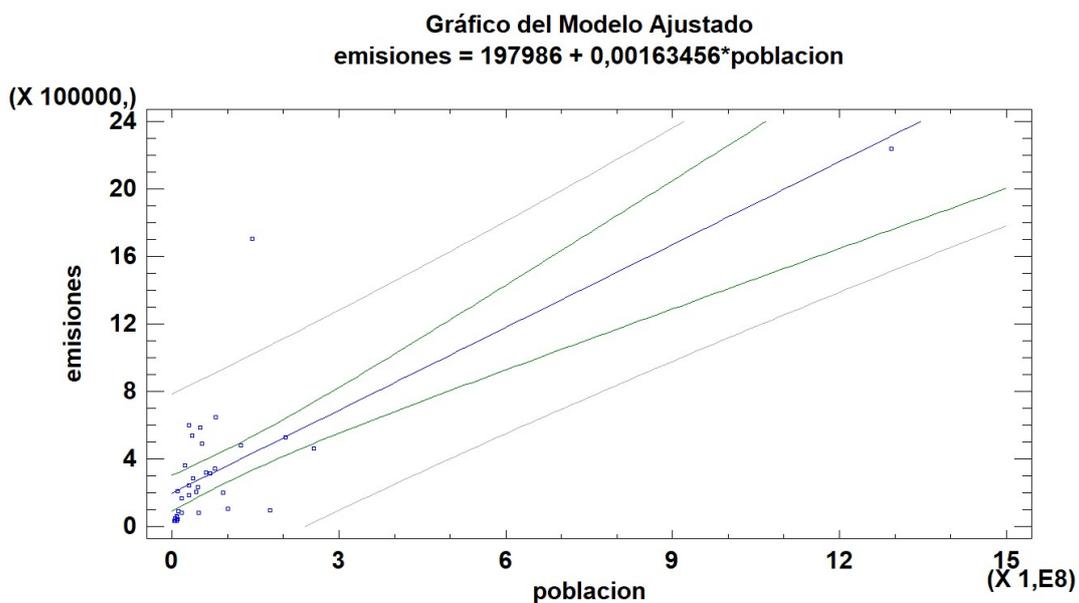


Imagen 37 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

Queda demostrada en este grupo también la relación directa entre las variables emisiones y población.

Relación PIB y emisiones

Coefficientes

Parámetro	Mínimos Cuadrados Estimado	Estándar Error	Estadístico T	Valor-P
Intercepto	-24521,3	99249,2	-0,247068	0,8064
Pendiente	4,53757E-7	9,62618E-8	4,71378	0,0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2,7996E12	1	2,7996E12	22,22	0,0000
Residuo	4,15786E12	33	1,25996E11		
Total (Corr.)	6,95746E12	34			

Coefficiente de Correlación = 0,634341
 R-cuadrada = 40,2388 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 38,4278 por ciento
 Error estándar del est. = 354959,
 Error absoluto medio = 217507,
 Estadístico Durbin-Watson = 1,61831 (P=0,0911)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,152707

Imagen 38 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

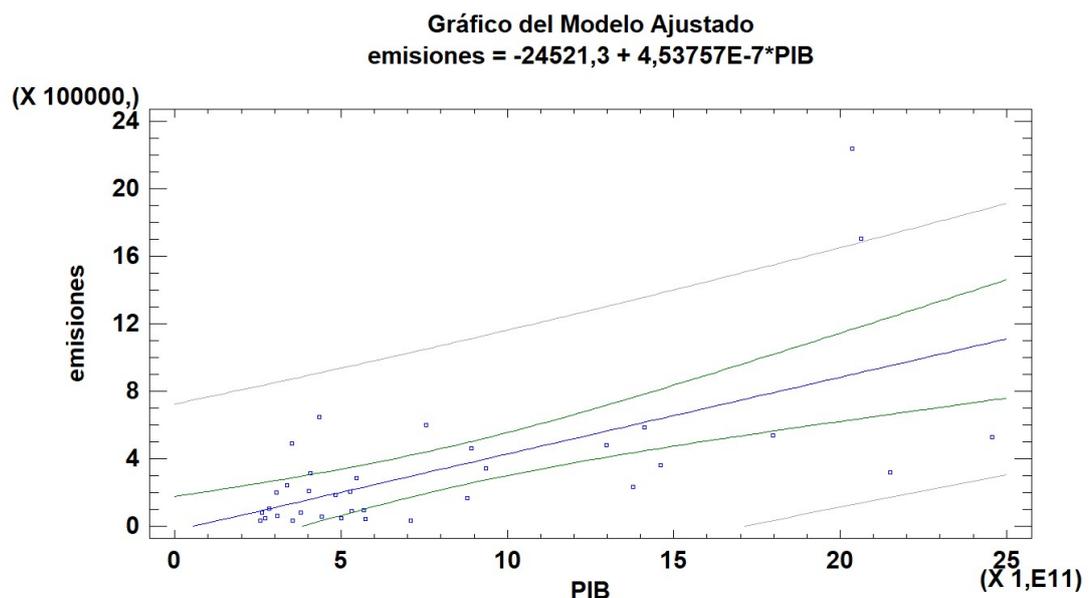


Imagen 39 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

En este caso todos los estadísticos nos muestran una relación directa entre las variables emisiones y PIB, con significancia estadística incluida.

Relación emisiones y porcentaje de energía renovable consumida

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	408665,	115278,	3,54504	0,0012
Pendiente	-2910,46	4124,75	-0,705607	0,4854

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1,03409E11	1	1,03409E11	0,50	0,4854
Residuo	6,85405E12	33	2,07698E11		
Total (Corr.)	6,95746E12	34			

Coefficiente de Correlación = -0,121914
R-cuadrada = 1,48631 por ciento
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = -1,49895 por ciento
Error estándar del est. = 455739,
Error absoluto medio = 268297,
Estadístico Durbin-Watson = 1,01316 (P=0,0008)
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,480188

Imagen 40 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

Los estadísticos indican que hay una ligera relación inversa entre las variables, tal y como se aprecia en el gráfico. Existen 2 países (Rusia e India) lejos de los intervalos de confianza y predicción. Volviendo a realizar la regresión sin ellos, los resultados mejoran

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

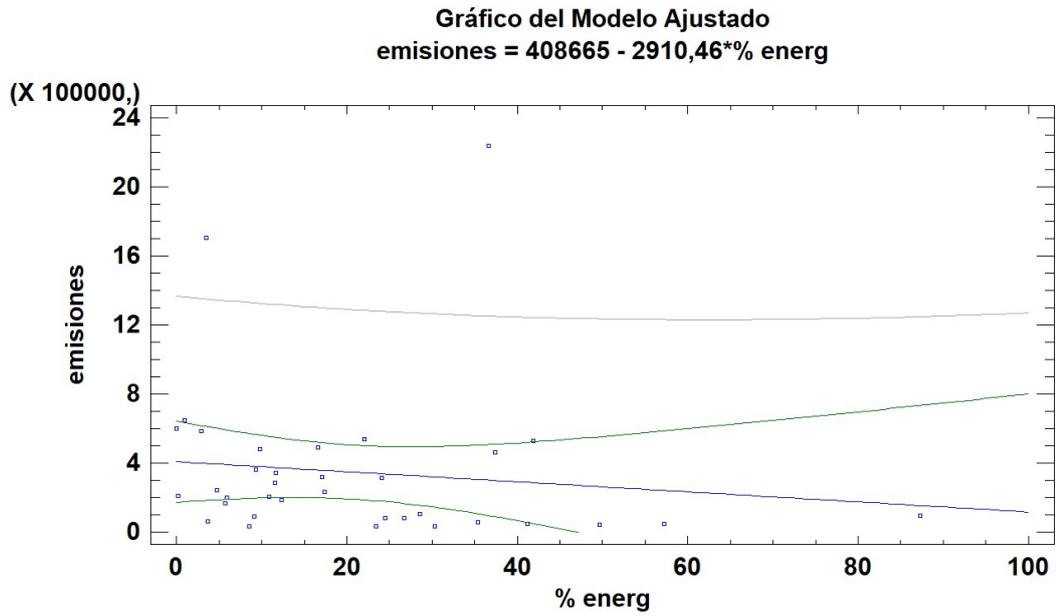


Imagen 41 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	324459,	48359,7	6,70929	0,0000
Pendiente	-3585,6	1723,45	-2,08048	0,0458

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	1,49836E11	1	1,49836E11	4,33	0,0458
Residuo	1,07313E12	31	3,4617E10		
Total (Corr.)	1,22296E12	32			

Coefficiente de Correlación = -0,350027
R-cuadrada = 12,2519 por ciento
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 9,42129 por ciento
Error estándar del est. = 186057,
Error absoluto medio = 155804,
Estadístico Durbin-Watson = 1,63251 (P=0,1367)
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,0934457

Imagen 42 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

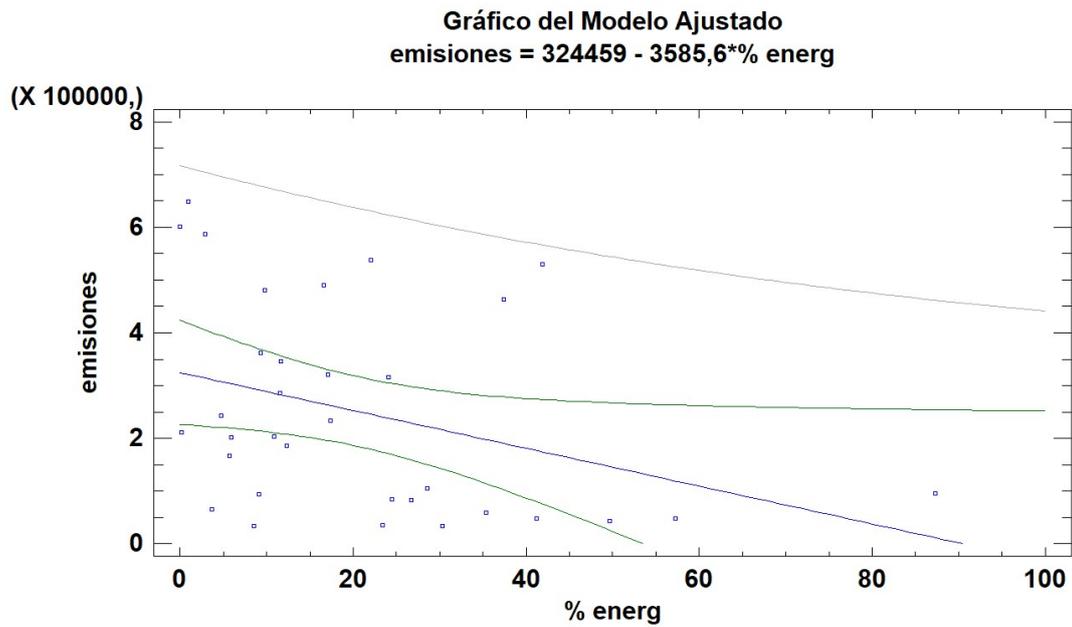


Imagen 43 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Con estos últimos estadísticos y gráfico podemos afirmar que existe una ligera relación inversa estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95%.

Relación producción de electricidad renovable y PVOUT

Coefficientes

Parámetro	Mínimos Cuadrados Estimado	Estándar Error	Estadístico T	Valor-P
Intercepto	81,3057	19,8928	4,08719	0,0003
Pendiente	-13,1504	5,02587	-2,61653	0,0133

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	4210,03	1	4210,03	6,85	0,0133
Residuo	20293,0	33	614,94		
Total (Corr.)	24503,0	34			

Coefficiente de Correlación = -0,414508
R-cuadrada = 17,1817 por ciento
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 14,672 por ciento
Error estándar del est. = 24,798
Error absoluto medio = 20,1815
Estadístico Durbin-Watson = 1,28324 (P=0,0150)
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,289025

Imagen 44 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

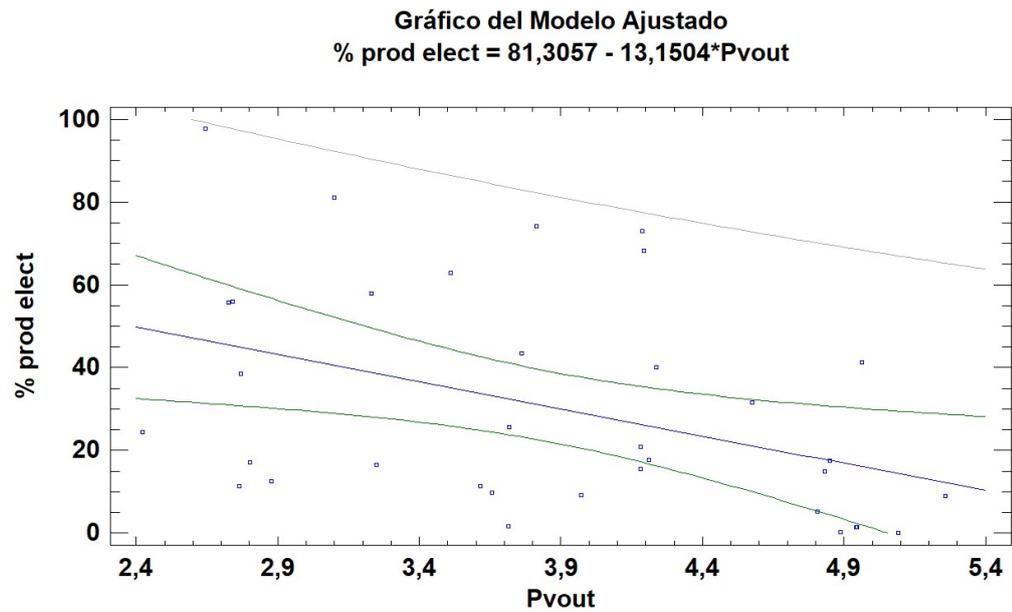


Imagen 45 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Existe una relación inversa estadísticamente significativa entre las variables, acompañada de una correlación de errores de predicción.

Correlaciones dentro del grupo "Bajo"

Relación entre PIB y población

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

Análisis de Regresión Múltiple

Parámetro	Error		Estadístico	
	Estimado	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	1,97439E10	1,17818E10	1,67581	0,0967
poblacion	823,023	411,741	1,99889	0,0482
continente=america	-1,43118E10	1,75399E10	-0,815957	0,4163
continente=asia	3,73772E10	1,74763E10	2,13873	0,0347
continente=europa	3,27995E10	1,8554E10	1,76778	0,0799
continente=oceania	-1,90795E10	2,15083E10	-0,887074	0,3770
poblacion*continente=america	4550,42	1498,21	3,03724	0,0030
poblacion*continente=asia	125,499	469,822	0,267121	0,7899
poblacion*continente=europa	3318,43	1245,1	2,66519	0,0089
poblacion*continente=oceania	-242,242	7813,67	-0,0310023	0,9753

Coefficients

continente	Intercepto	Pendiente
africa	1,97439E10	823,023
america	5,43211E9	5373,45
asia	5,71211E10	948,522
europa	5,25434E10	4141,45
oceania	6,64435E8	580,782

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2,21129E23	9	2,45699E22	8,94	0,0000
Residuo	2,94144E23	107	2,74901E21		
Total (Corr.)	5,15273E23	116			

R-Cuadrada = 42,9149 por ciento
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 38,1133 por ciento
Error estándar del est. = 5,2431E10
Error medio absoluto = 3,30639E10
Estadístico Durbin-Watson = 0,791802 (P=0,0000)
Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,603883

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	117	
CME	2,74901E21	
MAE	3,30639E10	
MAPE	302,497	
ME	-0,000014892	
MPE	-278,355	

Imagen 46 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

ANOVA Adicional para Variables Según el Orden de Introducción

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
poblacion	1,06754E23	1	1,06754E23	38,83	0,0000
Interceptos	6,92882E22	4	1,73221E22	6,30	0,0001
Pendientes	4,50869E22	4	1,12717E22	4,10	0,0039
Modelo	2,21129E23	9			

Imagen 47 Tabla ANOVA. (Fuente: Statgraphics)

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

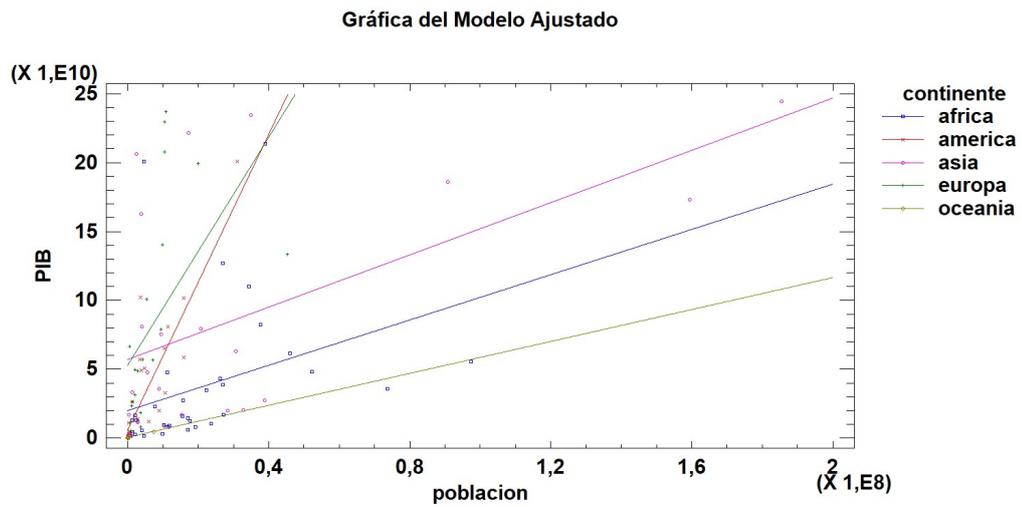


Imagen 48 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Relación directa con un nivel de confianza superior al 95% para Europa y América.

Relación entre emisiones y población

Análisis de Regresión Múltiple

<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>Estadístico T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	8815,97	7178,56	1,2281	0,2220
poblacion	0,0002785	0,000254078	1,09612	0,2754
continente=america	-6629,05	10402,9	-0,63723	0,5253
continente=asia	34101,3	10754,1	3,17101	0,0020
continente=europa	-6423,49	11427,7	-0,562097	0,5752
continente=oceania	-8243,11	12417,1	-0,663852	0,5081
poblacion*continente=america	0,00150989	0,000905166	1,66808	0,0981
poblacion*continente=asia	0,000310757	0,000290275	1,07056	0,2867
poblacion*continente=europa	0,004626	0,000771954	5,99258	0,0000
poblacion*continente=oceania	0,0000221708	0,00481273	0,00460669	0,9963

Coefficients

<i>continente</i>	<i>Intercepto</i>	<i>Pendiente</i>
africa	8815,97	0,0002785
america	2186,92	0,00178839
asia	42917,2	0,000589257
europa	2392,47	0,0049045
oceania	572,855	0,000300671

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	1,22407E11	9	1,36008E10	12,86	0,0000
Residuo	1,18487E11	112	1,05792E9		
Total (Corr.)	2,40894E11	121			

R-Cuadrada = 50,8137 por ciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 46,8612 por ciento

Error estándar del est. = 32525,7

Error medio absoluto = 16624,5

Estadístico Durbin-Watson = 1,47704 (P=0,0017)

Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,26059

Análisis de Residuos

	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>
n	122	
CME	1,05792E9	
MAE	16624,5	
MAPE	472,383	
ME	-1,26025E-11	
MPE	-449,546	

Imagen 49 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

ANOVA Adicional para Variables Según el Orden de Introducción

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
poblacion	4,95332E10	1	4,95332E10	46,82	0,0000
Interceptos	3,25609E10	4	8,14021E9	7,69	0,0000
Pendientes	4,03133E10	4	1,00783E10	9,53	0,0000
Modelo	1,22407E11	9			

Imagen 50 Tabla ANOVA. (Fuente: Statgraphics)

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

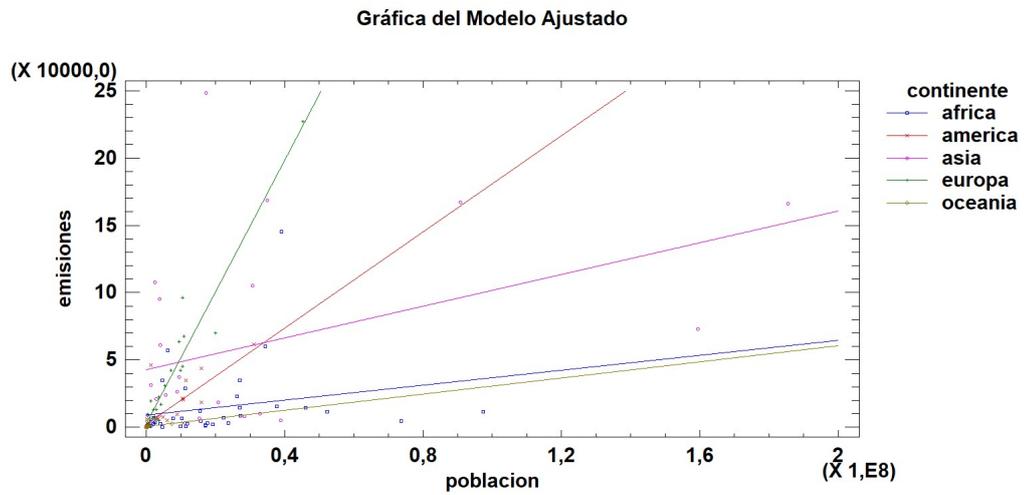


Imagen 51 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Relación lineal directa con un nivel de confianza superior al 95% para Europa.

Relación PIB y emisiones

Análisis de Regresión Múltiple

Parámetro	Error		Estadístico	
	Estimado	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	-2048,25	4952,07	-0,413614	0,6800
PIB	4,20168E-7	8,00636E-8	5,24792	0,0000
continente=america	3960,12	7832,87	0,505577	0,6142
continente=asia	-863,298	8891,09	-0,097097	0,9228
continente=europa	9730,73	9376,33	1,0378	0,3017
continente=oceania	2003,15	10743,5	0,186452	0,8524
PIB*continente=america	-1,02438E-7	1,3611E-7	-0,752609	0,4534
PIB*continente=asia	3,21496E-7	1,01222E-7	3,17616	0,0020
PIB*continente=europa	-4,96219E-8	1,0698E-7	-0,463843	0,6437
PIB*continente=oceania	9,37469E-9	0,00000466612	0,0020091	0,9984

Coefficients

continente	Intercepto	Pendiente
africa	-2048,25	4,20168E-7
america	1911,87	3,1773E-7
asia	-2911,54	7,41664E-7
europa	7682,49	3,70546E-7
oceania	-45,0967	4,29542E-7

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1,73256E11	9	1,92506E10	31,90	0,0000
Residuo	6,39601E10	106	6,03397E8		
Total (Corr.)	2,37216E11	115			

R-Cuadrada = 73,0372 por ciento
 R-Cuadrada (ajustada por g.l) = 70,7479 por ciento
 Error estándar del est. = 24564,1
 Error medio absoluto = 11068,9
 Estadístico Durbin-Watson = 2,16776 (P=0,8157)
 Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,0850086

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	116	
CME	6,03397E8	
MAE	11068,9	
MAPE	142,424	
ME	5,63595E-13	
MPE	-36,9911	

Imagen 52 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

ANOVA Adicional para Variables Según el Orden de Introducción

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
PIB	1,52053E11	1	1,52053E11	252,00	0,0000
Interceptos	7,8349E9	4	1,95873E9	3,25	0,0148
Pendientes	1,33675E10	4	3,34188E9	5,54	0,0004
Modelo	1,73256E11	9			

Imagen 53 Tabla ANOVA. (Fuente: Statgraphics)

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

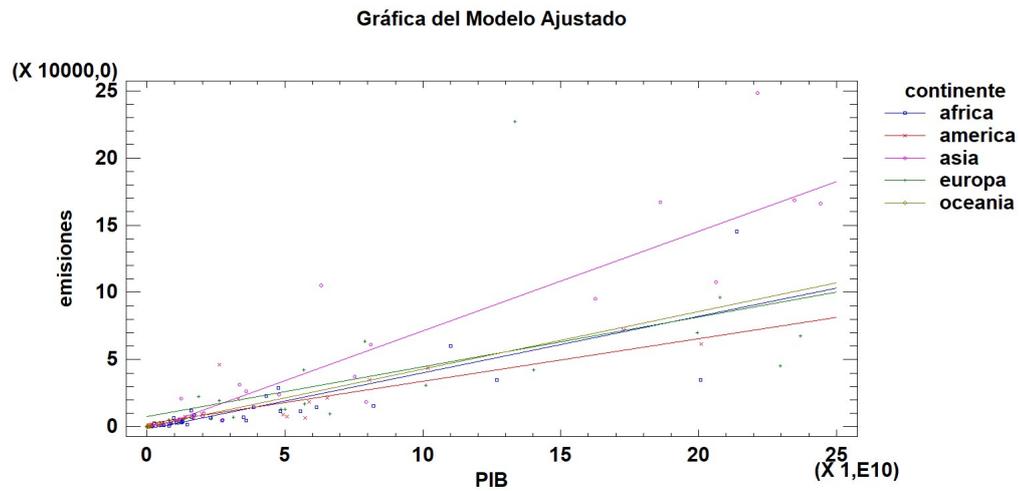


Imagen 54 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Relación estadísticamente significativa entre las variables. En el caso de Asia existe relación lineal directa entre las variables con un nivel de confianza del 95%.

Relación porcentaje electricidad renovable y PVOUT

Análisis de Regresión Múltiple

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	98,766	47,5796	2,07581	0,0402
Pvout	-11,8137	10,5112	-1,12392	0,2634
continente=america	168,815	91,7857	1,83923	0,0685
continente=asia	13,1271	73,3603	0,17894	0,8583
continente=europa	-85,5504	64,9662	-1,31684	0,1906
continente=oceania	-21,996	107,778	-0,204086	0,8387
Pvout*continente=america	-44,6345	21,1028	-2,1151	0,0366
Pvout*continente=asia	-8,08561	16,6483	-0,485672	0,6281
Pvout*continente=europa	16,882	16,5447	1,02039	0,3097
Pvout*continente=oceania	-2,7633	26,5404	-0,104117	0,9173

Coefficients

<i>continente</i>	<i>Intercepto</i>	<i>Pendiente</i>
africa	98,766	-11,8137
america	267,581	-56,4481
asia	111,893	-19,8993
europa	13,2156	5,06835
oceania	76,77	-14,577

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	24105,4	9	2678,38	2,74	0,0062
Residuo	110376,	113	976,782		
Total (Corr.)	134482,	122			

R-Cuadrada = 17,9247 por ciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 11,3877 por ciento

Error estándar del est. = 31,2535

Error medio absoluto = 24,4336

Estadístico Durbin-Watson = 1,77632 (P=0,1081)

Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,111103

Análisis de Residuos

	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>
n	123	
CME	976,782	
MAE	24,4336	
MAPE		
ME	-8,17413E-15	
MPE		

Imagen 55 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

ANOVA Adicional para Variables Según el Orden de Introducción

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Pvout	819,61	1	819,61	0,84	0,3616
Interceptos	15633,8	4	3908,45	4,00	0,0045
Pendientes	7652,01	4	1913,0	1,96	0,1057
Modelo	24105,4	9			

Imagen 56 Tabla ANOVA. (Fuente: Statgraphics)

Gráfica del Modelo Ajustado

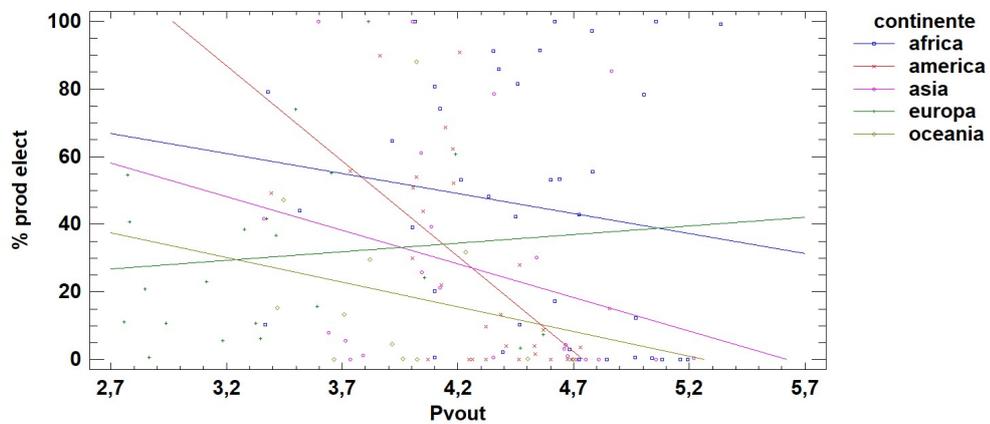


Imagen 57 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Relación lineal inversa estadísticamente significativa en América con un nivel de confianza del 95%.

Relación porcentaje electricidad solar y porcentaje electricidad renovable

Análisis de Regresión Múltiple

<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>		<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
		<i>Estándar</i>	<i>T</i>		
CONSTANTE	50,18	6,40028	7,84028	0,0000	
% solar	-9,55742	7,91699	-1,2072	0,2299	
continente=america	-22,9332	9,64429	-2,37791	0,0191	
continente=asia	-33,1534	9,86298	-3,36139	0,0011	
continente=europa	-15,6955	10,5501	-1,48771	0,1396	
continente=oceania	-26,8071	13,0144	-2,0598	0,0417	
% solar*continente=america	6,55795	13,5649	0,483449	0,6297	
% solar*continente=asia	60,6536	20,7824	2,9185	0,0042	
% solar*continente=europa	7,70904	8,22277	0,937524	0,3505	
% solar*continente=oceania	7,5093	8,55875	0,877383	0,3821	

Coefficients

<i>continente</i>	<i>Intercepto</i>	<i>Pendiente</i>
africa	50,18	-9,55742
america	27,2468	-2,99947
asia	17,0266	51,0962
europa	34,4844	-1,84838
oceania	23,3729	-2,04812

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	20526,2	9	2280,69	2,26	0,0229
Residuo	113956,	113	1008,46		
Total (Corr.)	134482,	122			

R-Cuadrada = 15,2632 por ciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 8,51422 por ciento

Error estándar del est. = 31,7562

Error medio absoluto = 25,2237

Estadístico Durbin-Watson = 1,78483 (P=0,1172)

Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,107159

Análisis de Residuos

	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>
n	123	
CME	1008,46	
MAE	25,2237	
MAPE		
ME	-5,66123E-15	
MPE		

Imagen 58 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

ANOVA Adicional para Variables Según el Orden de Introducción

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
% solar	1847,86	1	1847,86	1,83	0,1785
Interceptos	10051,5	4	2512,88	2,49	0,0470
Pendientes	8626,79	4	2156,7	2,14	0,0806
Modelo	20526,2	9			

Imagen 59 Tabla ANOVA. (Fuente: Statgraphics)

Gráfica del Modelo Ajustado

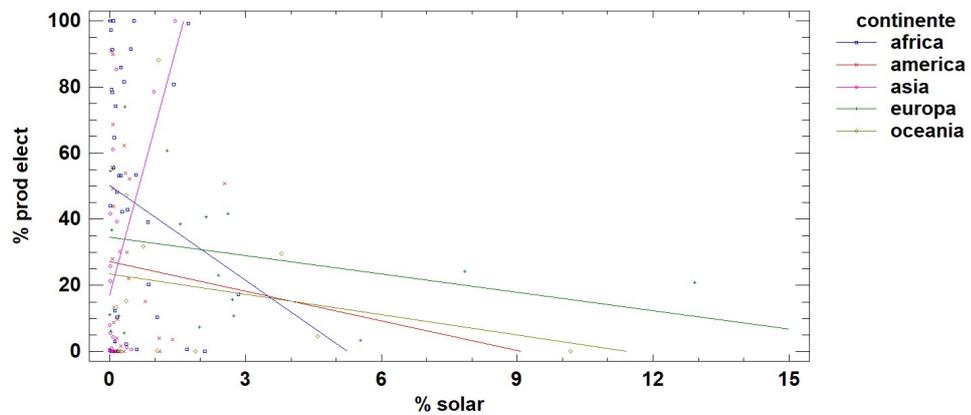


Imagen 60 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Relación lineal directa estadísticamente significativa en Asia con un nivel de confianza del 95%.

Relación porcentaje electricidad producida mediante energía solar y PVOUT

Análisis de Regresión Múltiple

	<i>Error</i>		<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	-0,435077	2,44195	-0,178168	0,8589
Pvout	0,203255	0,539468	0,376769	0,7071
continente=america	-0,268802	4,71076	-0,0570613	0,9546
continente=asia	0,888692	3,7651	0,236034	0,8138
continente=europa	0,688402	3,33429	0,206461	0,8368
continente=oceania	-15,4107	5,53155	-2,78596	0,0063
Pvout*continente=america	0,0495013	1,08307	0,0457047	0,9636
Pvout*continente=asia	-0,266077	0,854448	-0,311402	0,7561
Pvout*continente=europa	0,344365	0,84913	0,40555	0,6858
Pvout*continente=oceania	4,32587	1,36214	3,17578	0,0019

Coefficients

<i>continente</i>	<i>Intercepto</i>	<i>Pendiente</i>
africa	-0,435077	0,203255
america	-0,703879	0,252756
asia	0,453615	-0,0628218
europa	0,253324	0,54762
oceania	-15,8458	4,52912

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	109,44	9	12,16	4,73	0,0000
Residuo	290,742	113	2,57294		
Total (Corr.)	400,182	122			

R-Cuadrada = 27,3475 por ciento
 R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 21,5611 por ciento
 Error estándar del est. = 1,60404
 Error medio absoluto = 0,80406
 Estadístico Durbin-Watson = 2,11795 (P=0,7424)
 Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,0601091

Análisis de Residuos

	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>
n	123	
CME	2,57294	
MAE	0,80406	
MAPE		
ME	4,80194E-16	
MPE		

Imagen 61 Análisis de varianza y estadísticos. (Fuente: Statgraphics)

ANOVA Adicional para Variables Según el Orden de Introducción

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Pvout	7,9666	1	7,9666	3,10	0,0812
Interceptos	71,9501	4	17,9875	6,99	0,0000
Pendientes	29,5231	4	7,38078	2,87	0,0263
Modelo	109,44	9			

Imagen 62 Tabla ANOVA. (Fuente: Statgraphics)

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

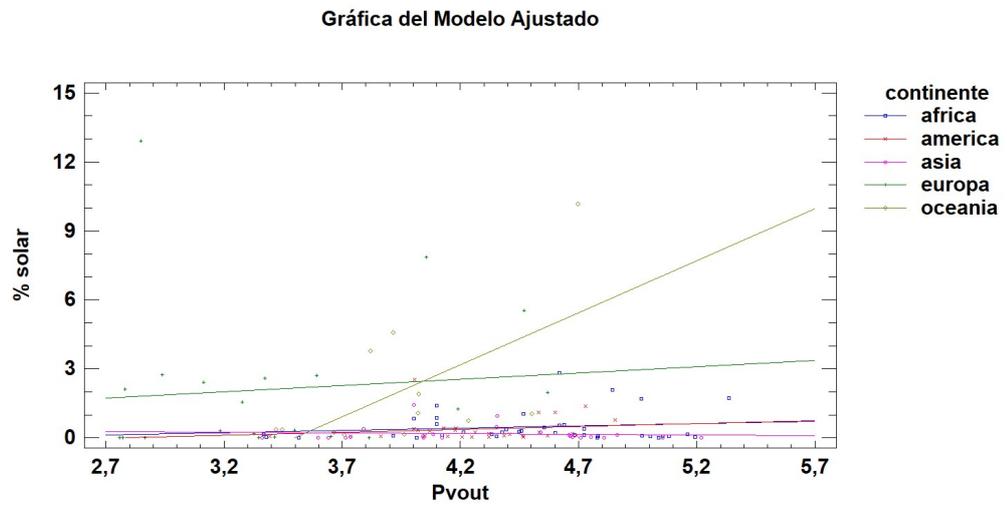


Imagen 63 Gráfico del modelo lineal. (Fuente: Statgraphics)

Relación lineal directa estadísticamente significativa en Oceanía con un nivel de confianza del 95%.

Interpretación de las relaciones por grupos

Grupo "Alto"

Alto				
Relación	Correlación	Significancia estadística	Durbin-Watson	Comentarios
PIB - Población	0,97	Si	Independencia	Sin EE.UU.
CO ₂ - Población	0,95	Si	Independencia	
PIB - CO ₂	0,9	Si	Independencia	Sin China
CO ₂ - Energía	Sin relación			
Electr. - PVOUT	Sin relación			
Solar - Electr.	0,5	No	Independencia	Datos dentro del intervalo de confianza
PIB - Solar	-0,59	No	Independencia	
PIB - PVOUT	0,83	Si	Independencia	
Población - PVOUT	0,86	No	Independencia	Sin China
PVOUT - Solar	Sin relación			
CO ₂ - Electr.	-0,53	No	Independencia	

Tabla 5 Relaciones entre variables del grupo "Alto". (Fuente: propia)

Se observa que los países más poblados son los que tienen mayor PIB, mayores emisiones y mayor potencial fotovoltaico. También se aprecia una relación entre

el porcentaje de electricidad proveniente de energías renovables y porcentaje de electricidad proveniente de energía solar. La última relación directa se observa entre el potencial fotovoltaico y la población.

Las relaciones inversas se dan entre el PIB y el porcentaje de electricidad producida mediante energía solar y entre el potencial fotovoltaico y el porcentaje de electricidad producida mediante energía solar, aunque no son estadísticamente significativas.

No se observa relación entre el porcentaje de electricidad producido por renovable y PVOOUT medio.

Los países de este grupo que mayor PIB tienen son los que más electricidad pueden producir mediante energía solar al disponer, por un lado, de la mayor capacidad de producción y, por otro, al no aprovechar de manera clara esa capacidad. Además, es recomendable que exploten este potencial ya que son los más contaminantes y en los que habitan más personas que se pueden ver expuestas a los efectos nocivos de la contaminación.

Grupo "Intermedio"

Intermedio				
Relación	Correlación	Significancia estadística	Durbin-Watson	Comentarios
PIB - Población	Directa	Si	Dependencia	Europa
CO ₂ - Población	0,78	Si	Independencia	
PIB - CO ₂	0,63	Si	Independencia	
CO ₂ - Energía	-0,35	Si	Independencia	Sin Rusia e India
Electr. - PVOOUT	-0,41	Si	Dependencia	
Solar - Electr.	Sin relación			
PIB - Solar	Sin relación			
PIB - PVOOUT	Sin relación			
Población - PVOOUT	Sin relación			
PVOOUT - Solar	Sin relación			
CO ₂ - Electr.	Sin relación			

Tabla 6 Relaciones entre variables del grupo "Intermedio". (Fuente: propia)

Las relaciones directas más claras ocurren entre las variables población y PIB, población y emisiones, PIB y emisiones. Las relaciones inversas se dan entre emisiones y porcentaje de energía consumida renovable, porcentaje de electricidad renovable y PVOOUT.

En este escenario los países que mayor PIB tienen también son los más poblados y los que mayores emisiones tienen, por lo que exponen a mayor cantidad de personas a mayor contaminación.

También se demuestra estadísticamente que el aumento del consumo de energías renovables viene acompañada de una reducción de emisiones, lo que puede justificar la instalación de paneles solares fotovoltaicos.

La última relación estadísticamente significativa indica que los países que más electricidad de origen renovable producen son los que menos capacidad de producción de electricidad mediante fotovoltaica tienen. Esto nos dice que la tecnología fotovoltaica está muy poco extendida incluso en países que apuestan por las energías renovables.

Grupo "Bajo"

Bajo				
Relación	Correlación	Significancia estadística	Durbin-Watson	Comentarios
PIB - Población	Directa	Si	Dependencia	Europa y América
CO₂ - Población	Directa	Si	Dependencia	Europa
PIB - CO₂	Directa	Si	Independencia	Asia
CO₂ - Energía	Sin relación			
Electr. - PVOUT	Inversa	Si	Independencia	América
Solar - Electr.	Directa	Si	Independencia	Asia
PIB - Solar	Sin relación			
PIB - PVOUT	Sin relación			
Población - PVOUT	Sin relación			
PVOUT - Solar	Directa	Si	Independencia	Oceanía
CO₂ - Electr.	Sin relación			

Tabla 7 Relaciones entre variables del grupo "Bajo". (Fuente: propia)

Al ser un grupo más amplio de países, las relaciones son más débiles y sólo en algunos continentes.

Relación directa entre población y PIB en Europa y América.

Relación lineal directa entre población y emisiones en Europa.

Estudio del uso real y potencial de energía solar a nivel mundial a partir de cartografía de radiación solar y variables socioeconómicas

Relación lineal directa entre las variables PIB y emisiones en Asia

Relación lineal inversa en América entre porcentaje de electricidad renovable y PVOUT.

Relación lineal directa en Asia entre electricidad mediante energía solar y electricidad mediante renovables.

Relación lineal directa en Oceanía entre electricidad mediante solar y PVOUT.

En este grupo Europa es el continente que a mayor población, mayor PIB y mayores emisiones, por lo que la reducción de emisiones debería ser prioritaria en este continente y se dispone de poder económico para realizarla.

En América los países que más apuestan por las renovables no han realizado grandes inversiones en fotovoltaica.

En Asia la producción de electricidad mediante energía solar sí que influye en el porcentaje de electricidad producida por renovables, es un continente que ha apostado por la tecnología fotovoltaica.

Por último, Oceanía sí es capaz de aprovechar el potencial fotovoltaico de su territorio.

5. Conclusiones

A continuación se procederá a responder a las preguntas formuladas en el inicio del estudio para obtener las conclusiones que finalicen el trabajo.

¿Cuál es el potencial de la energía solar a nivel mundial?

El potencial de la energía solar es innegable a nivel mundial y esperanzador a nivel particular. El país con mayor porcentaje de electricidad producida mediante energía fotovoltaica no alcanza el 13% y sólo 6 países de todos los estudiados superan el 5%. Un aumento de estos porcentajes puede suponer una gran reducción de emisiones, lo cual es necesario para cumplir con los acuerdos que tienen como fin la supervivencia del planeta. Además de esta ventaja, la energía solar puede ofrecer otras.

El caso de China habla por sí solo. Es el país con mayor potencia fotovoltaica instalada. Con casi 80 GW instalados en 2016, cuenta además con una gran industria de energía solar que produce paneles solares para el resto del mundo. Sólo en 2017 se instalaron 53 GW gracias a la gran inversión realizada por el país para aumentar la capacidad de producción de energías renovables. Aún así, en 2014 la generación de electricidad mediante paneles fotovoltaicos supuso apenas el 0,41% del total.

Los territorios de este país que reciben mayor radiación son a su vez las más pobres y por lo tanto de menores necesidades energéticas. Antes de la crisis global, se producía una gran exportación de productos fotovoltaicos. Debido a medidas antidumping y la falta de subvenciones por parte de países europeos y de Estados Unidos, esa demanda exterior se redujo, lo que provocó el aumento de la instalación en territorio nacional.

Otro país que muestra el impacto de la energía solar es India, donde la instalación de paneles no tiene como fin la sustitución, por el momento, de centrales alimentadas por combustibles fósiles. Se busca aumentar el porcentaje de población con acceso a la electricidad en zonas rurales, el cual ha aumentado desde el 60% en 2008 al 70% en 2014. Por esta razón la energía solar juega un factor importante en este país, ya que proporciona facilidades a la hora de crear microrredes.

Un último ejemplo puede ser América Latina. Existe un gran potencial de energías renovables combinadas de tal forma que cada país podría especializarse en sus fortalezas y establecer una conexión a nivel internacional que explotara sus recursos. Chile y Perú tienen una gran capacidad de generar

electricidad de origen solar, mientras que en Brasil circulan vientos lo suficientemente fuertes como para explotarlos de forma constante. Una interconexión entre países podría generar electricidad por el día gracias a la solar, y por la noche gracias a sistemas de almacenamiento y eólica.

Como se ha podido ver, el potencial de esta energía no sólo supone una mejora de la calidad de vida al reducir las emisiones, sino una oportunidad de desarrollo económico en zonas poco desarrolladas.

¿Cómo está distribuida la radiación solar en el mapa global?

La imagen 3 al comienzo del trabajo representa el potencial fotovoltaico en el mapa global y por tanto la radiación solar. La zona oeste de América, el Golfo Pérsico, sur de Europa y África en general son las zonas donde la radiación es mayor. A su vez, las zonas desérticas de Asia y Oceanía reciben gran cantidad de radiación.

¿Qué variables de carácter económico y social pueden ayudar a estudiar mejor el potencial de la energía solar?

Las emisiones de CO₂ nos pueden indicar las zonas donde hay que priorizar a la hora de implantar fuentes de energía renovable como la energía solar. El PIB también comparte la mayor importancia con las emisiones ya que se necesita inversión para poder realizar los proyectos e instalaciones que permitan explotar la energía solar.

¿Qué cálculos se realizan para obtener resultados que representen mejor la realidad?

La estadística tiene un papel fundamental a la hora de estudiar lo que ocurre en el mundo real mediante análisis de varianza, regresiones lineales...pero a su vez es vital que la toma de datos sea correcta y represente de manera fiel la realidad.

Se ha observado que de los grupos en los que se ha dividido la muestra de países, los que menor PIB tenían también han sido los más complicados de encontrar relaciones. Se necesitaría mejorar la toma de datos en estas zonas para poder tener resultados representativos de esos países.

¿Qué países son más representativos de las diferentes formas de explotación de la energía solar?

Entre los países con mayor PIB llama la atención Alemania. Alemania es una de las potencias mundiales que más fuerte ha apostado por la integración de energías renovables. Un proceso que ha llevado a cabo desde la década de los setenta y de una manera más intensa desde principios de siglo, con el crecimiento de partidos políticos que defienden tomar medidas que faciliten la instalación de fuentes de energía renovables.

Hoy en día Alemania sigue un proyecto a nivel industrial y político llamado Energiewende, un proceso que durará años y que tiene como objetivo llegar al 50% de generación de electricidad mediante fuentes de energía renovables en 2030 y más del 80% en 2050.

El cierre de todas las plantas nucleares en 2022, el cierre de algunas centrales térmicas de carbón y los incentivos para la generación renovable son medidas que se reflejan en las estadísticas de energía del país. En 2014 ya superó el 25% de producción de electricidad mediante fuentes renovables y en los primeros meses de 2015 alcanzó el 30%, por lo que la meta a alcanzar del 35% en 2020 es factible.

Otra forma diferente de explotación de energías renovables se da en África. África es un continente que recibe una gran cantidad de irradiación solar. Dado que muchas zonas están subdesarrolladas, el estado de la energía solar fotovoltaica se encuentra en una situación diferente a las del resto.

Habitualmente la forma de obtener energía eléctrica era mediante el uso de combustibles fósiles, con pequeños generadores. Pero esta realidad ha cambiado desde 2015 en favor de paneles solares debido a la reducción de su precio, que lo ha hecho mucho más competitivo.

Las baterías ven reducidas sus capacidades para evitar la necesidad de un convertidor, por lo que se venden objetos que funcionan con corriente continua. El comprador suele tener un poder adquisitivo muy limitado, no dispone de grandes objetos en su domicilio que consuman gran cantidad de energía.

Esto confiere un sistema eléctrico con una red que no necesita un gran y complicado sistema de transporte, ya que las personas que logran acceder a la energía eléctrica forman un sistema de autoconsumo sin conexión a red. La energía solar fotovoltaica es una de las grandes esperanzas para este continente, que tiene un sistema eléctrico muy precario en términos de calidad, continuidad y accesibilidad. La electricidad que llega a los hogares suele sufrir cortes, además de existir regiones en las que un porcentaje muy bajo puede acceder a ella, especialmente en zonas rurales. En el año 2014, en Angola sólo el

32% de la población total tenía acceso a la electricidad. En ese mismo año, sólo 3% de la población rural de la República Centroafricana tenía acceso a esta energía.



Imagen 64 Panel solar en África. (Fuente: ElConfidencial)

¿Cuáles son las conclusiones finales?

Como conclusiones finales, podemos afirmar que aun existiendo realidades muy diferentes entre sí, la energía solar otorga un gran número de ventajas para todas ellas.

Por supuesto el mayor de los beneficios del aumento de consumo de energía eléctrica producida por paneles fotovoltaicos sería la reducción de las emisiones de CO₂, cobrando mayor importancia en los países que más emiten y por lo tanto que más dañan el planeta.

Para las potencias mundiales, además puede suponer una gran oportunidad de negocio, ya sea produciendo una gran cantidad de elementos fotovoltaicos y ocupar una parte de la cuota del mercado debido al incremento de la demanda gracias al descenso de los costes, o bien invirtiendo en investigación que puede desembocar en un descenso más pronunciado de los precios y una mayor calidad, o incluso la opción de reciclaje de paneles solares. Una u otra elección conllevará una creación de empleo que para países cuya economía está estancada puede suponer un empuje.

En regiones menos desarrolladas, la energía solar puede suponer un antes y un después tanto para la población como para la economía. Para la población puede suponer una mejor calidad de vida provocada por la formación de personas en esta tecnología, acceso a electricidad, automatizar actividades que

permitan escolarizar a más personas...Y para la economía puede suponer por un lado un pilar sobre el que apoyarse gracias a la creación de puestos de trabajo y por otro una ayuda a la industrialización con la llegada de la electricidad a más lugares y con mayor calidad.

No podemos olvidar que para obtener un sistema eléctrico sostenible, de calidad y fiabilidad la energía solar necesita de las demás fuentes de energía renovables para complementarse, además de disponer de sistemas de almacenamiento para mitigar la intermitencia de estas tecnologías. La energía solar no presenta en la actualidad un gran desarrollo, pero ofrece un futuro prometedor que puede suponer grandes cambios a nivel global. Cambios que nos permitan seguir transformando y evolucionando.

6. Bibliografía

https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO_2017_ExecutiveSummary_Spanish_version.pdf (Febrero 2018)

http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/07/17-8399_GSR_2017_KEY-FINDINGS_Spanish_lowres.pdf (Febrero 2018)

http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_SPANISH.pdf (Febrero 2018)

http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/10/GFR-Full-Report-2017_webversion_3.pdf (Febrero 2018)

https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2016_ExecutiveSummary_Spanishversion.pdf (Febrero 2018)

<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TrackingCleanEnergyProgress2017.pdf> (Febrero 2018)

<http://www.bancomundial.org/> (Enero – Julio 2018)

<https://www.elperiodico.com/es/especiales/connecting-africa-desarrollo/energia-solar.html> (Junio 2018)

www.cia.gov (Abril 2018)

<https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/energia-fotovoltaica-radiacion-geometria-recorrido-optico-irradiancia-y-hsp/> (Marzo 2018)

<https://www.nytimes.com/es/2018/02/02/opinion-energias-renovables-america-latina/> (Junio 2018)

<https://www.lavanguardia.com/internacional/20180114/434286760378/nueva-revolucion-africa-sol.html> (Junio 2018)

Apuntes del Grado en Ingeniería Eléctrica