

Bases de Datos de Radiación Solar

Energía Solar Fotovoltaica

Oscar Perpiñán Lamigueiro

Universidad Politécnica de Madrid

① Introducción

② Estaciones Meteorológicas

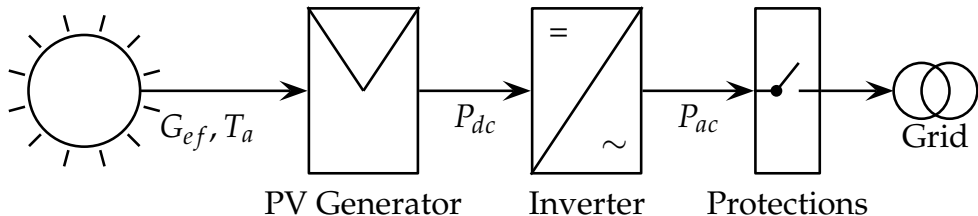
③ Imágenes de Satélite

④ Métodos híbridos

⑤ Control de calidad

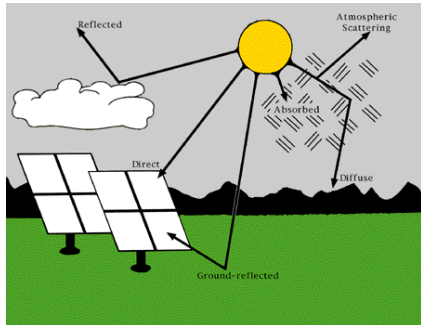
Radiación Solar y Sistemas Fotovoltaicos

- ▶ La **energía producida** por un sistema fotovoltaico depende principalmente de la **radiación incidente** en el generador.
- ▶ Consecuentemente, la **estimación del comportamiento** de un sistema FV en un determinado lugar durante un período temporal exige **conocer la radiación solar disponible en el plano del generador**.



La radiación solar no se puede calcular analíticamente

- ▶ La radiación solar que alcanza la superficie terrestre es el resultado de complejas interacciones en la atmósfera.
- ▶ Para estimar la radiación se necesitan medidas terrestres o imágenes de satélite.



Ángulo de Inclinación

- ▶ Los generadores FV tienen un **ángulo de inclinación positivo** para maximizar el rendimiento.
- ▶ Este ángulo depende de la **latitud** del lugar y de la **aplicación del sistema**.



Bases de Datos de Radiación Solar

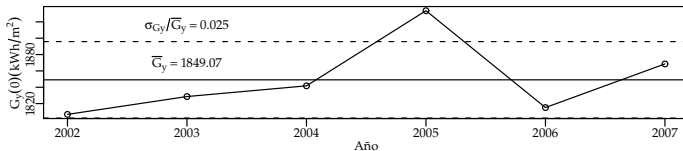
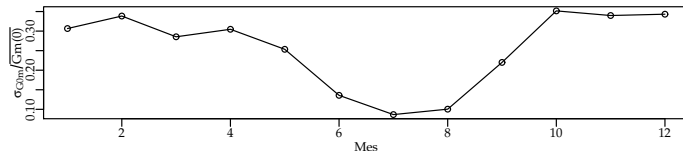
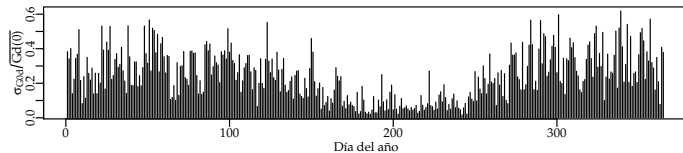
- ▶ Por tanto, es inviable mantener una base de datos de radiación solar **incidente**.
- ▶ Las **bases de datos** registran radiación en el **plano horizontal**.
- ▶ La estimación de la radiación incidente en el plano inclinado requiere un **procedimiento de transposición**.

Variabilidad Temporal y Espacial

- ▶ La irradiancia solar extraterrestre depende de la latitud y el instante temporal (*proceso determinista*).
- ▶ La irradiancia solar incidente en la superficie terrestre es resultado de la interacción con la atmósfera cambiante: **variabilidad temporal y espacial** (*proceso estocástico*).

Variabilidad Temporal

Variabilidad de la irradiación diaria, mensual y anual durante el período comprendido entre 2001-2008 en Carmona, Sevilla



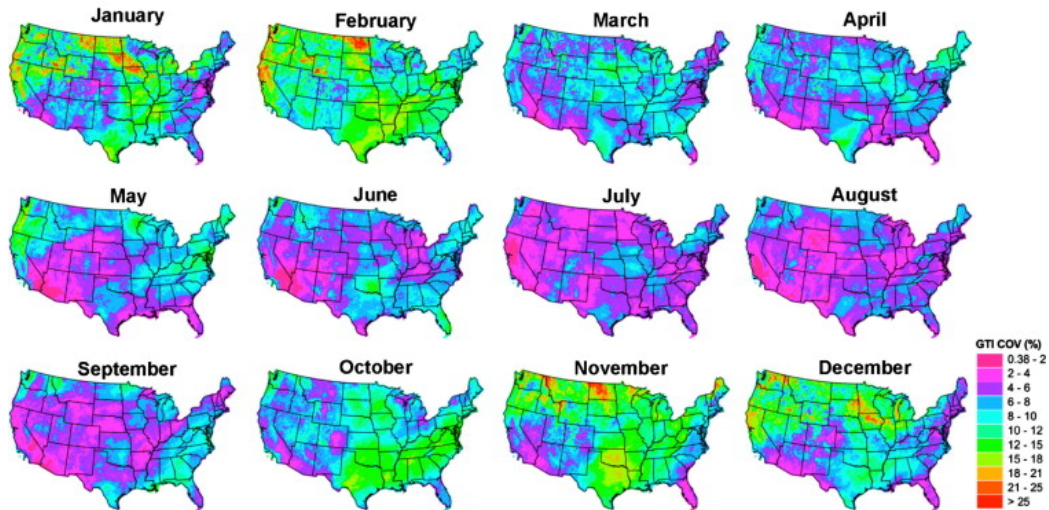
Variabilidad Temporal

$$\sigma_{\overline{G}} = \frac{\sigma_G}{\sqrt{N}}$$

- ▶ Predicción para un (día, mes, año) **determinado**:
 - ▶ Intervalo de confianza del 95% acotado por $1.96 \cdot \sigma_G$
- ▶ Predicción para un (día, mes, año) **promedio (durante N años)**:
 - ▶ Intervalo de confianza del 95% acotado por $1.96 \cdot \sigma_{\overline{G}}$

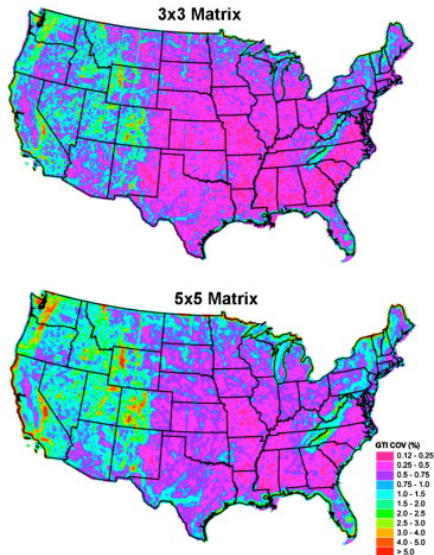
Variabilidad Espacial

Monthly GTI Interannual COV (%)
1998-2005



Variabilidad Espacial

Spatial GTI COV (%) of Annual Average 1998-2005



Estimación a partir de Medidas

- ▶ Para estimar la radiación incidente es necesario contar con:
 - ▶ **Medidas cercanas** (variabilidad espacial): distancia no superior a 10 km.
 - ▶ **Series temporales** largas (variabilidad temporal): 10 años.

Fuentes de datos

► Estaciones meteorológicas

- Series largas y con tiempos de muestreo altos.
- Baja resolución espacial (medidas puntuales)
- Precisión en caso de medida directa.
- Tipos:
 - Con medidor de radiación
 - Sin medidor de radiación (modelos empíricos).

Fuentes de datos

▶ Estaciones meteorológicas

- ▶ Series largas y con tiempos de muestreo altos.
- ▶ Baja resolución espacial (medidas puntuales)
- ▶ Precisión en caso de medida directa.
- ▶ Tipos:
 - ▶ Con medidor de radiación
 - ▶ Sin medidor de radiación (modelos empíricos).

▶ Imágenes de satélite

- ▶ Tiempos de muestreo bajos (mejorando)
- ▶ Resolución espacial alta
- ▶ Error debido a la estimación.

Fuentes de datos

▶ Estaciones meteorológicas

- ▶ Series largas y con tiempos de muestreo altos.
- ▶ Baja resolución espacial (medidas puntuales)
- ▶ Precisión en caso de medida directa.
- ▶ Tipos:
 - ▶ Con medidor de radiación
 - ▶ Sin medidor de radiación (modelos empíricos).

▶ Imágenes de satélite

- ▶ Tiempos de muestreo bajos (mejorando)
- ▶ Resolución espacial alta
- ▶ Error debido a la estimación.

▶ Híbrido

- ▶ Medidas terrestres combinadas con imágenes de satélite

① Introducción

② Estaciones Meteorológicas

③ Imágenes de Satélite

④ Métodos híbridos

⑤ Control de calidad

② Estaciones Meteorológicas

Fundamentos

Fuentes de Datos

Medida directa

La medida directa de radiación solar se realiza con un piranómetro.



- ▶ Pila termoeléctrica (termopares con barniz negro)
 - ▶ Alojamiento con dos hemiesferas de cristal.
 - ▶ Flujo de calor por radiación provoca tensión eléctrica en termopila.
- ▶ Respuesta espectral plana para radiación visible.
- ▶ Respuesta perfecta al coseno del ángulo de incidencia (pérdidas por reflexión).

Medida directa

La red de estaciones que miden directamente radiación es escasa para estimaciones precisas en regiones grandes

- ▶ Un piranómetro requiere mantenimiento y calibración frecuente.
- ▶ La proporción de estaciones con piranómetros es baja respecto a las que miden temperatura ambiente y precipitación (1:500).

Modelos empíricos

Frente a la baja densidad de estaciones con medida directa de radiación se emplean modelos empíricos

- ▶ Relaciones entre radiación y otras variables
 - ▶ Horas de brillo (*sunshine duration*)
 - ▶ Cobertura nubosa
 - ▶ Temperatura ambiente
 - ▶ Precipitación
 - ▶ Humedad
 - ▶ ...
- ▶ Los coeficientes de los modelos sólo se pueden ajustar en estaciones con medidas de radiación.
- ▶ Los coeficientes dependen del lugar de ajuste, pero se pueden interpolar para otras localizaciones.

Ejemplos de modelos empíricos

- ▶ Radiación y Horas de Brillo (Angstrom y Prescott)

$$\frac{G(0)}{B_o(0)} = a_1 + b_1 \frac{S}{S_o}$$

- ▶ Radiación y Temperatura (Bristow y Campbell)

$$G(0) = a (1 - \exp(-b\Delta T^c)) \cdot B_o(0)$$

- ▶ Variaciones con más variables: Lluvia (si/no), rango antes y después, velocidad viento, humedad relativa.

$$G(0) = a (1 - \exp(-b\Delta T^c)) \cdot B_o(0) \cdot \left(1 + \sum_1^n p_j \cdot v_j \right) + p_{n+1}$$

② Estaciones Meteorológicas

Fundamentos

Fuentes de Datos

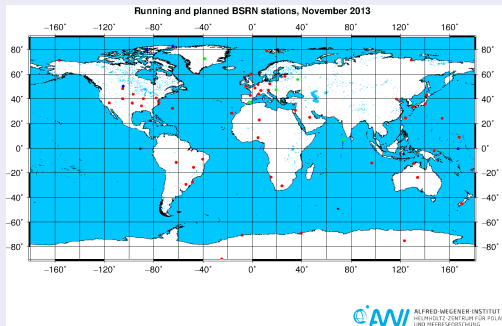
Wiki con recursos

<https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki>

Baseline Surface Radiation Network

<http://www.bsrn.awi.de/>

- ▶ BSRN proporciona datos casi continuos, a largo plazo, observados in situ, de la superficie terrestre e irradiancias de banda ancha (infrarrojo solar y térmico) de una red de más de 50 sitios globalmente diversos.
- ▶ Se emplea para la validación y confirmación de modelos satelitales y otros.



Measurement and Instrumentation Data Center NREL

Radiación global, directa y difusa (y otras variables) con muestreo de 1 min en diversas localidades de EEUU.

<http://www.nrel.gov/midc/>



SIAR

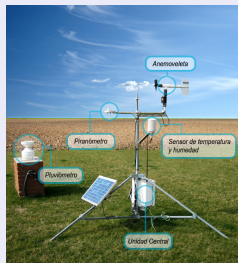
<https://servicio.mapa.gob.es/websiar/>

- ▶ El Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SiAR) registra datos agroclimáticos relacionados con demanda hídrica de las zonas de riego.
- ▶ Más de 400 estaciones.
- ▶ Valores diarios y horarios



Sensores

- ▶ Temperatura y Humedad
- ▶ Piranómetro
- ▶ Anemoveleta
- ▶ Pluviómetro
- ▶ Temperatura del suelo (algunas)



Radiación

- ▶ Alrededor de 30 estaciones en todo el territorio.
- ▶ Medidas de global, difusa y directa.
- ▶ Sólo gráficas.

Estaciones «convencionales»

- ▶ Presión, temperatura, viento, humedad, lluvia.
- ▶ Permite descarga de datos horarios por día.

Redes de Comunidades Autónomas

- ▶ Meteogalicia
- ▶ MeteoNavarra
- ▶ Cataluña
- ▶ MeteoEuskadi
- ▶ Andalucía

① Introducción

② Estaciones Meteorológicas

③ Imágenes de Satélite

④ Métodos híbridos

⑤ Control de calidad

③ Imágenes de Satélite

Fundamentos

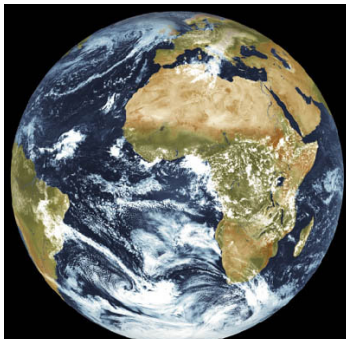
Fuentes de Datos

Fundamentos

- ▶ Los satélites meteorológicos están equipados con **radiómetros** (sensores de radiación electromagnética a diferentes frecuencias) que captan **radiación emitida por la Tierra**.
- ▶ La radiación emitida por la Tierra depende de la **reflexión del suelo**, y la **geometría y composición de la atmósfera**.
- ▶ Diferentes fenómenos físicos se detectan en **bandas de frecuencias** distintas (canales).
- ▶ Existen diversos procedimientos para **estimar radiación solar** en superficie a partir de la información de los diferentes canales del radiómetro.

Satelites Geoestacionarios Europeos: Meteosat

- ▶ **MFG:** Meteosat First Generation (7 satélites)
 - ▶ Equipados con el radiómetro MVIRI (Meteosat Visible and Infrared Imager).
 - ▶ Tres canales: visible, infrarrojo, vapor de agua.
- ▶ **MSG:** Meteosat Second Generation (4 satélites)
 - ▶ Equipados con dos radiómetros:
 - ▶ **SEVIRI** (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager): 12 canales
 - ▶ GERB (Geostationary Earth Radiation Budget): infrarrojo visible.
- ▶ **MTG:** Meteosat Third Generation (1 satélite, por ahora)



Procedimientos: Heliosat-2

Pasos

- ▶ Establecer **albedo de referencia** (*suelo*).
 - ▶ Estimar **índice de cobertura nubosa**.
 - ▶ Estimar radiación en superficie a partir de cobertura nubosa y **modelo de cielo claro**.
-
- ▶ Empleado para base HelioClim
 - ▶ Usan datos de SEVIRI
 - ▶ Accesible via SoDa: <https://www.soda-pro.com/help/helioclim/heliosat-2>

Procedimientos: CM SAF

Fundamento

- ▶ Se emplea el modelo libRadtran (**Radiative Transfer Model, RTM**), para generar una matriz de estados (**Look-up table, LUT**) que relaciona la transmitancia atmosférica y el albedo de la atmósfera para variedad de estados.
- ▶ La irradiancia en superficie se estima multiplicando la irradiancia extra-atmosférica por la **transmitancia atmosférica determinada interpolando en la LUT**.

Procedimientos: CM SAF

- ▶ **Dos LUTs:** cielo nuboso, cielo claro.
 - ▶ **Cielo nuboso:**
 - ▶ Estimación de albedo y estado atmosférico a partir de imágenes.
 - ▶ Estimación de transmitancia interpolando en LUT para cielo nuboso.
 - ▶ **Cielo claro:**
 - ▶ Estimación de transmitancia interpolando en LUT para cielo claro **sin estimación previa** de albedo.
- ▶ Emplean datos del **radiómetro MSG/SEVIRI**

Procedimientos: LSA SAF

- ▶ Generación de **máscara de nubes** a partir de imagen usando algoritmo de **NWC-SAF**.
- ▶ Para **zonas sin nubes**: modelo de cielo claro sin usar datos de imagen.
- ▶ Para **zonas cubiertas**: modelo de transmitancia atmosférica a partir de imágenes.
- ▶ Emplean datos del **radiómetro MSG/SEVIRI**

③ Imágenes de Satélite

Fundamentos

Fuentes de Datos

Wiki con recursos

<https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki>

Surface meteorology and Solar Energy (SSE)

- ▶ 200 parámetros meteorológicos y de energía solar derivados de imágenes de satélite.
- ▶ Base de datos de casi 40 años.
- ▶ Resolución $1^{\circ} \times 1^{\circ}$
- ▶ Variable de interés: *All Sky Surface Shortwave Downward Irradiance*

<https://power.larc.nasa.gov/>

EUMETSAT - SAF

- ▶ **EUMETSAT** es la agencia europea de satélites en operación, para la monitorización de la meteorología, clima y el medio ambiente.
- ▶ **Satellite Application Facilities (SAFs)**
 - ▶ Centros dedicados al procesamiento de datos de satélite.
 - ▶ Generan y distribuyen los productos y servicios EUMETSAT.

SAFs

- ▶ **SAF on Climate Monitoring (CM SAF)**: datos derivados de imágenes de satélite adecuados para la monitorización del clima.
 - ▶ Operational Products: conjuntos de datos proporcionados casi en tiempo real.
 - ▶ Climate Data Records (CDR): series temporales de medidas de longitud, consistencia, y continuidad suficiente para determinar la variabilidad y cambios en el clima.
- ▶ **SAF on Land Surface Analysis (LSA SAF)**: genera, archiva y distribuye productos operacionales con un conjunto de parámetros relacionados con la radiación en superficie, la evotranspiración, cobertura vegetal e incendios.

SAFs: Radiación

- ▶ **CM SAF:** Surface incoming shortwave radiation ([Daily SIS](#), [Monthly SIS](#))
 - ▶ AEMET analizó las estimaciones para España en su [Atlas de Radiación](#).
- ▶ **LSA SAF:** Down-welling surface short-wave radiation flux ([DSSF](#))

- ① Introducción
- ② Estaciones Meteorológicas
- ③ Imágenes de Satélite
- ④ Métodos híbridos
- ⑤ Control de calidad

Interpolación Espacial

Objetivo: mejorar la resolución espacial de medidas dispersas

- ▶ **Inverse Distance Weighting (IDW):** determinista (los pesos w_i son una función inversa de la distancia.)

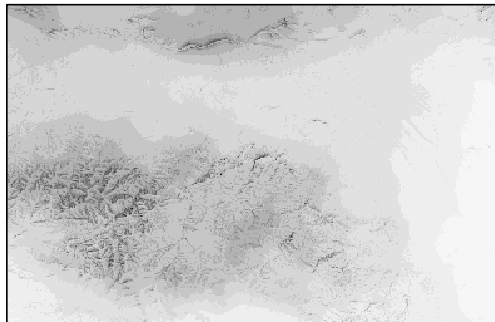
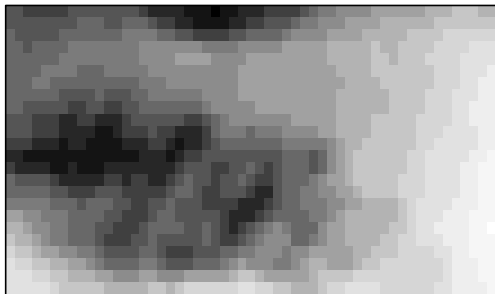
$$\hat{G}_d(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i G_d(x_i)}{\sum_{i=1}^N w_i}, \quad w_i = \frac{1}{d(x_0, x_i)^p}$$

- ▶ **Ordinary Kriging:** modelo determinista para la media (constante) y estocástico para residuos.

$$\hat{G}(\mathbf{s}) = \mu_G + \epsilon_G(\mathbf{s})$$

- ▶ **Kriging with External Drift (KED):** modelo determinista para la media incorporando información de una variable con alta densidad espacial.

Corrección por topografía



Sky-View Factor (SVF) Proporción de cielo visible para un receptor horizontal (afecta a la radiación difusa isotrópica)

Horizon blocking Bloqueo de región circumsolar por horizonte: afecta a radiación directa y difusa anisotrópica

https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html

- ▶ Datos de radiación en el plano horizontal de CM-SAF
- ▶ Permite incorporar la corrección por topografía (SVF y horizon blocking) con perfil estándar o con datos importados.

① Introducción

② Estaciones Meteorológicas

③ Imágenes de Satélite

④ Métodos híbridos

⑤ Control de calidad

Introducción

Las medidas recogidas por estaciones meteorológicas se deben filtrar para eliminar datos erróneos.

- ▶ Límites Físicos
- ▶ Tests de variabilidad
- ▶ Coherencia espacial

⑤ Control de calidad

Límites físicos

Tests de variabilidad

Coherencia espacial

Irradiación Diaria

- ▶ La radiación global en el plano horizontal debe ser inferior a la extraterrestre ($K_{td} \leq 1$)

$$G_d(0) \leq B_{od}(0)$$

- ▶ El índice de claridad debe ser superior a 0.03

$$K_{td} = \frac{G_d(0)}{B_{od}(0)} \geq 0.03$$

- ▶ La radiación global en el plano horizontal debe ser inferior a la de un modelo de cielo claro

Irradiancia (intradiaria)

- El índice de claridad debe ser inferior a 1 cuando la altura solar es suficiente:

$$k_t < 1 \text{ si } \gamma_s > 2^\circ$$

- Límites inferiores para cielos cubiertos (baja transparencia atmosférica)

$$k_t \geq 10^{-4} \cdot (\gamma_s - 10^\circ) \text{ si } \gamma_s > 10^\circ$$

$$G \geq 0 \text{ si } \gamma_s \leq 10^\circ$$

⑤ Control de calidad

Límites físicos

Tests de variabilidad

Coherencia espacial

Tests de variabilidad

Se realizan sobre medidas de **irradiancia**.

Test de persistencia

Cuando un sensor falla proporciona un valor constante (baja desviación estándar). Si funciona de forma intermitente, la variabilidad puede ser muy alta.

$$\frac{1}{8}\bar{k}_t \leq \sigma_{k_t} \leq 0.35$$

La media y la desviación estándar se calculan con todas las muestras de un día completo.

Test de rampas

Comprueba la existencia de saltos excesivos de irradiancia entre instantes sucesivos.

$$|k_t(t) - k_t(t-1)| < 0.75 \quad \text{si} \quad \gamma_s(t) > 2^\circ$$

⑤ Control de calidad

Límites físicos

Tests de variabilidad

Coherencia espacial

Planteamiento

- ▶ Las medidas de una estación se pueden comparar con las recogidas por estaciones cercanas.
- ▶ Esta comprobación debe realizarse con **datos agregados** (diarios) (la variabilidad espacial intradiaria puede ser alta)
- ▶ Esta comprobación debe realizarse con estaciones que tienen **clima y geografía similar**.

Procedimiento

- ▶ Estimamos la irradiación en el lugar, x_0 , con la interpolación espacial de las estaciones cercanas, x_i .

$$\hat{G}_d(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i G_d(x_i)}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

Los pesos w_i son una función inversa de la distancia d entre las estaciones (IDW).

$$w_i = 1/d^2(x_0, x_i)$$

- ▶ Comparamos la irradiación estimada, $\hat{G}_d(x_0)$, con la medida en la estación, $G_d(x_0)$.

$$\left| \hat{G}_d(x_0) - G_d(x_0) \right|$$

- ▶ La diferencia absoluta debe estar por debajo de un límite (p.ej. 50%)

Métricas para diferencias

- Mean Bias Difference (MBD), diferencia media (indica si la medida, X , está por encima o debajo de la referencia, R):

$$MBE = \overline{\mathbf{D}} = \overline{\mathbf{X}} - \overline{\mathbf{R}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - r_i)$$

- Root Mean Square Difference (RMSD), diferencia cuadrático media:

$$RMSD = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 \right)^{1/2} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - r_i)^2 \right)^{1/2}$$

- Mean Absolute Deviation (MAD):

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - r_i|$$