

Predicción A Corto Plazo De Obstrucción De Disco Solar Mediante El Análisis Del Movimiento De Nubes A Partir De Imágenes De Cielo Completo.

César Husillos Rodríguez

Alumno de Máster GEOMET 2012/2013, Universidad de Granada

Abstract. El objetivo de este trabajo es predecir la obstrucción del disco solar por paso de nubes en un lugar concreto y con minutos de antelación.

Se han usado las imágenes tomadas a intervalos de un minuto, proporcionadas por la cámara de cielo completo, ubicada en la terraza del Centro Andaluz de Medio Ambiente (CEAMA).

Como hipótesis de trabajo se ha supuesto que existe una única capa de nubes a una altura dada, y que su movimiento es solidario en todo el campo de visión.

Se ha aplicado a cada imagen un reciente y novedoso algoritmo de clasificación de cielo de Cazorla et al. (2008) que distingue entre nube gruesa, delgada y cielo despejado. Unos programas desarrollados en PYTHON procesan las imágenes de cielo completo, obteniendo el movimiento de las nubes y generando predicciones sobre la obstrucción del disco solar para horizontes temporales entre uno y diez minutos. El criterio de decisión sobre la obstrucción en un instante concreto viene dado por un valor umbral, que se aplica a una magnitud que relaciona la irradiancia solar extraterrestre y la irradiancia solar global registrada a nivel del suelo, ambas sobre una superficie horizontal.

A fin de cubrir el mayor número de escenarios posibles, se ha puesto a prueba el algoritmo en una muestra de diez días, con condiciones de nubosidad muy variadas.

Tras el análisis de los resultados, se concluye que los porcentajes de éxito y los mejores tiempos de predicción dependen de la cobertura nubosa. La predicción más exacta se da para el caso de días en los que la capa de nubes varía lentamente, bien porque domina el cielo despejado o bien el cielo completamente cubierto. Los valores de éxito son superiores al 90% para tiempos de predicción inferiores a 4 minutos. En cielos muy variables, en los que el Sol se cubre por nubes y se despeja en cortos periodos de tiempo, el éxito de predicción es superior al 70%. Los tiempos de predicción son mayores que los anteriores (entre cuatro y siete minutos). Por encima de siete minutos, nunca se obtiene el máximo de éxito en la predicción.

Keywords: predicción, cobertura nubosa, obstrucción, hough

INTRODUCCIÓN

La Irradiancia Directa Normal (IDN) se ve afectada de forma notable por efecto de las nubes, los aerosoles y el contenido de vapor de agua en la atmósfera. De todos ellos, el factor que domina es la nubosidad, sobre todo en sistemas que dependen de la IDN para producir energía. Este tipo de sistemas requieren de ingeniería de control que mantenga constante la tasa de producción de energía. Es por esto que, a día de hoy, es necesario implementar un sistema de predicción que estime, con minutos de antelación, el movimiento de las nubes y la posible obstrucción del disco solar (Marquez and Coimbra, 2013).

Un sistema de predicción es tanto mejor cuanto mayores son las resoluciones temporales y espaciales de los datos que se manejan. Se entiende por *resolución espacial* el área representada por un pixel de la imagen. *Resolución temporal* es el tiempo que transcurre entre dos imágenes consecutivas de una misma localización.

La metodología que implementa la observación desde Tierra tiene la ventaja de proporcionar información con muy buena resolución espacial y temporal. La inversión inicial en la instalación, el mantenimiento y la actualización de equipos es mucho menor que la que se basa en instrumental sobre plataformas volantes.

Dos conceptos que se manejan habitualmente en este tipo de estudios son: el horizonte temporal y el éxito en la predicción. El *horizonte temporal* es el intervalo de tiempo para el cual se realiza una predicción. El *éxito en la predicción* es el cociente del tiempo en el que las predicciones son correctas respecto al tiempo total en el que se realizan predicciones, expresado en %.

Existen referencias, pero la literatura no es demasiado extensa. En el trabajo de Chow et al. (2011) se hace uso de todo un despliegue tecnológico para estimar la variación de la IDN en una superficie de varios kilómetros cuadrados. Los autores emplean una cámara que tiene limitaciones importantes: una banda de sombra que oscurece bastante área de la imagen y un bajo rango dinámico que produce saturación en la zona circumsolar. Su horizonte temporal mínimo es de 30 segundos. El éxito en la predicción para los cuatro días analizados en este trabajo es del 70% pero depende, de forma crítica, de la velocidad de la nube y del horizonte temporal de predicción. El trabajo de Marquez and Coimbra (2013) es más modesto en cuanto a instrumentación y objetivos. Usando una cámara comercial como la de los autores antes mencionados (Chow et al., 2011), estudian la predictibilidad de la IDN en horizontes temporales que van de 3 a 15 minutos. Toman como muestra cuatro días con gran variabilidad en la cobertura nubosa, por ser los casos más difíciles de tratar. Su mejor tiempo de predicción es de 5 minutos.

DATOS

Para el desarrollo de este trabajo se hace uso de (ver figure 1)

- Imágenes del All-Sky Imager (A-SI) de cielo completo y en proyección esférica, tomadas cada minuto. El promedio diario es de 432 imágenes.
- Imágenes de clasificación de cielo, obtenidas tras aplicar el algoritmo desarrollado por Cazorla et al. (2008).
- Medidas de Irradiancia Global en superficie horizontal para los días de estudio.

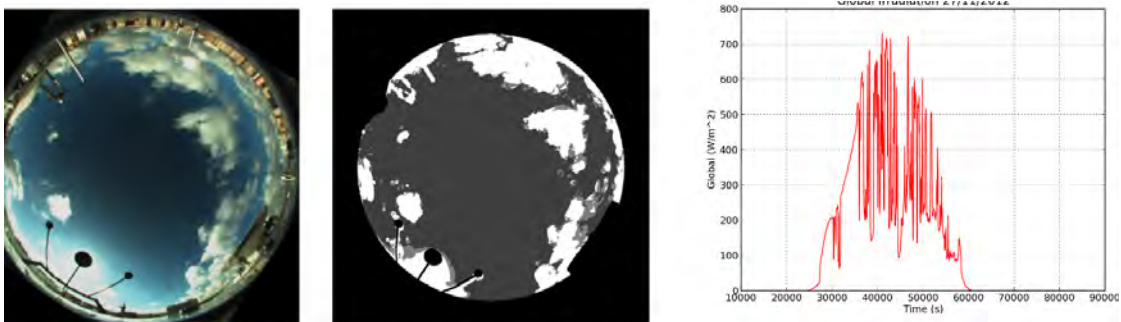


FIGURE 1. Ejemplo de datos usados en este trabajo: (izquierda) imagen (A-SI), (centro) imagen de clasificación de cielo, (derecha) gráfica de Irradiancia Global sobre superficie horizontal ara uno de los días analizados.

METODOLOGÍA

Resumida en la figure 2.

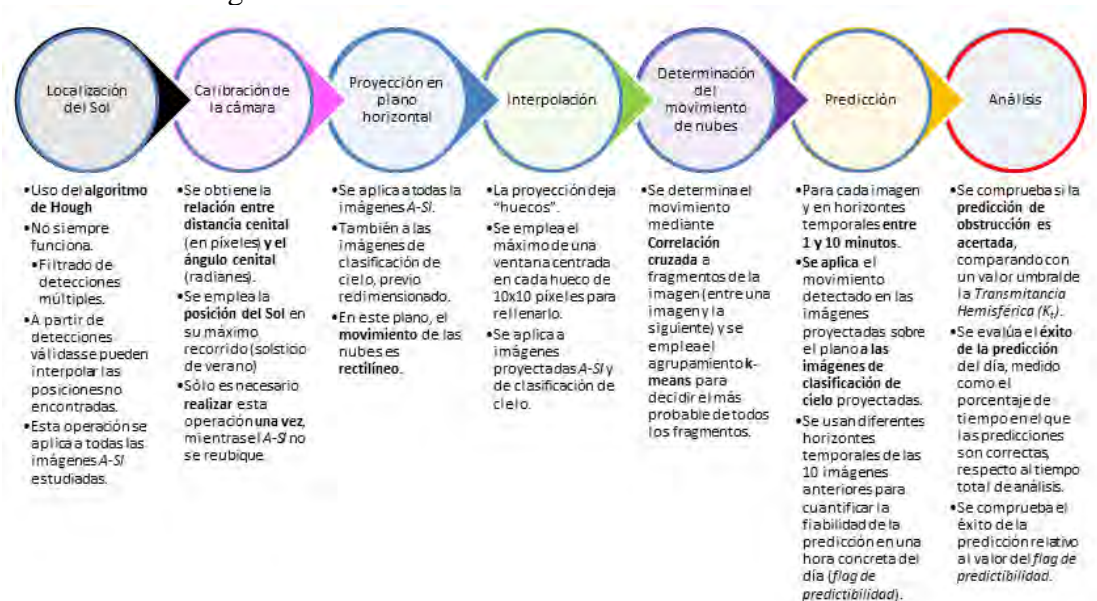


FIGURE 2. Metodología seguida en el desarrollo del trabajo. Se muestra secuencialmente cada una de las tareas realizadas y un breve resumen de cada una de ellas.

Para poder cumplir con los objetivos, hay que resolver **dos problemas importantes**: la localización del Sol en la imagen, y la caracterización del movimiento de nubes.

- La *localización del Sol* es complicada debido a las condiciones variables de cobertura nubosa, carga de aerosol y masa de aire, esta última muy variable a lo largo del día.
- Para obtener el *movimiento de las nubes* se necesita comparar una imagen con la anterior. Además de los problemas mencionados para la detección del disco solar (que también influyen en la determinación del movimiento), está el cambio de forma de la nube por efecto de condensación o disipación. Incluso suponiendo que las nubes no cambian de forma, si se observa una secuencia de imágenes tomada por el All-Sky Imager (A-SI) en la que hay nubes, se puede apreciar que trayectorias seguidas por éstas son curvas centradas en el céntit. El vector velocidad depende, en dirección y módulo, del ángulo cenital. Otro efecto geométrico que dificulta o hace imposible el reconocimiento de una nube es la distorsión introducida por la lente, que la deforma tanto más cuanto mayor es el ángulo cenital. Un problema más que añadir en la caracterización del movimiento aparece cuando hay varias capas de nubes a diferentes alturas. Como la velocidad del viento en cada capa es diferente en dirección y módulo, dependiendo de qué nube se esté siguiendo su movimiento aparente será uno en concreto.

Para simplificar este trabajo, se establece la hipótesis de que **las nubes se localizan de una única capa** a una altura concreta.

Aún queda una decisión importante que tomar al respecto de las trayectorias de las nubes: se puede hacer un estudio en base a las trayectorias curvas que presentan en la imagen A-SI, o se puede transformar la imagen esférica proyectándola sobre un plano horizontal, situado a una altura igual a la de la base de la capa de nubes.

Las ventajas de esta proyección son que las trayectorias son rectas, y que el campo de velocidades no depende del ángulo cenital. El inconveniente es que hay que obtener y aplicar las ecuaciones de la proyección. Las ventajas pesan más, así que se opta por la proyección en un plano horizontal.

Las *ecuaciones de proyección* permiten establecer la correspondencia entre las coordenadas que tiene un pixel en la imagen A-SI y las que tendrá en el plano horizontal. Se necesita una referencia de la que se conozca sus coordenadas (x, y) en la imagen A-SI, además de su ángulo cenital (el ángulo acimutal se conserva). La referencia seleccionada es el Sol. Su posición se determina haciendo uso de algoritmo de Hough. A veces falla, pero se resuelve el problema mediante interpolación.

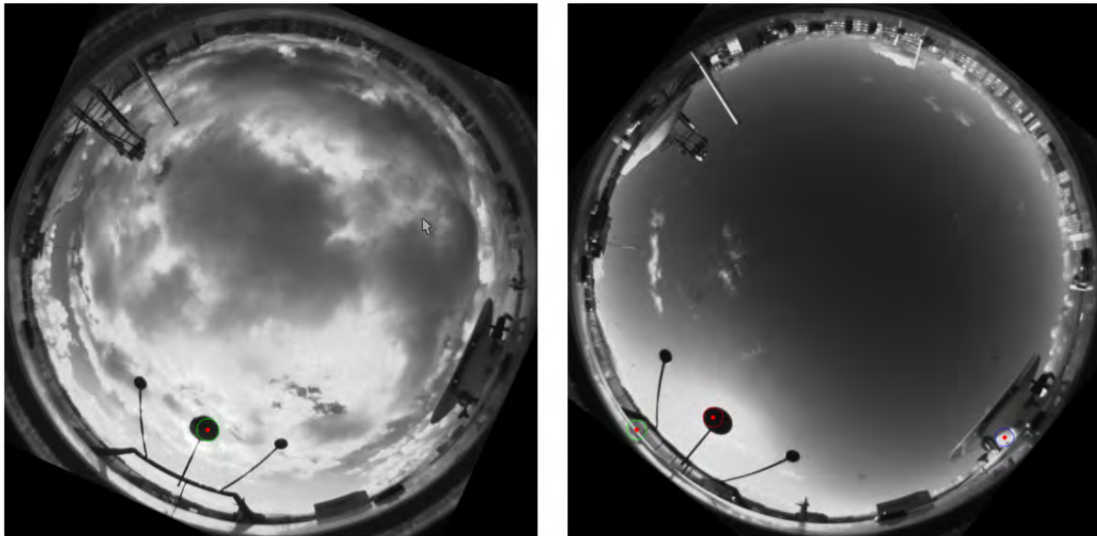


FIGURE 3. Resultado del algoritmo de Hough para la detección del disco solar. En la imagen de la izquierda acierta. Falla en la de la derecha (reflexiones en edificios cercanos o instrumentos)

Una vez caracterizada las ecuaciones de proyección, se transforman imágenes del A-SI y de clasificación de cielo.

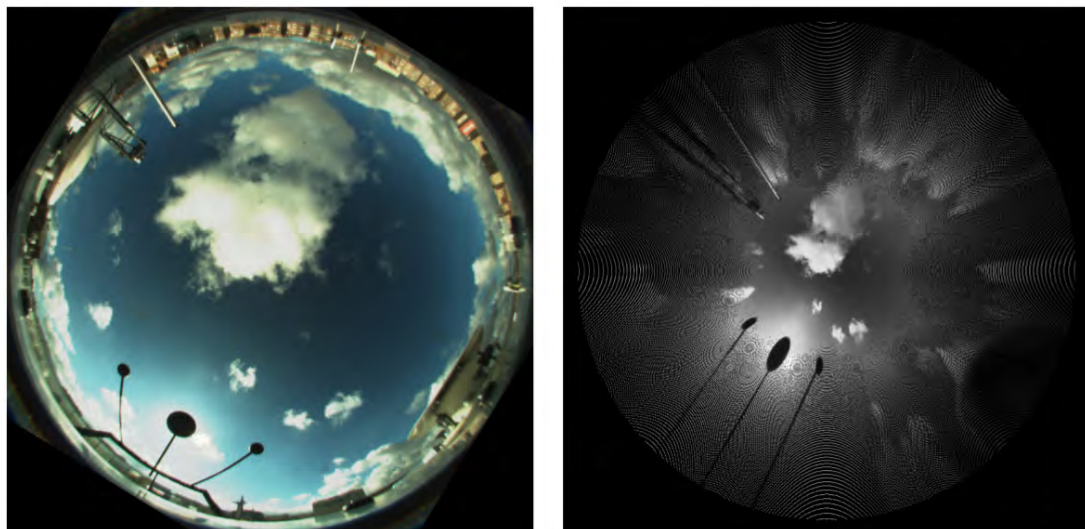


FIGURE 4. Proyección de imagen A-SI. Los huecos son más evidentes a medida que aumenta la distancia cenital.

La proyección deja huecos en la imagen proyectada, que se rellenan mediante interpolación.

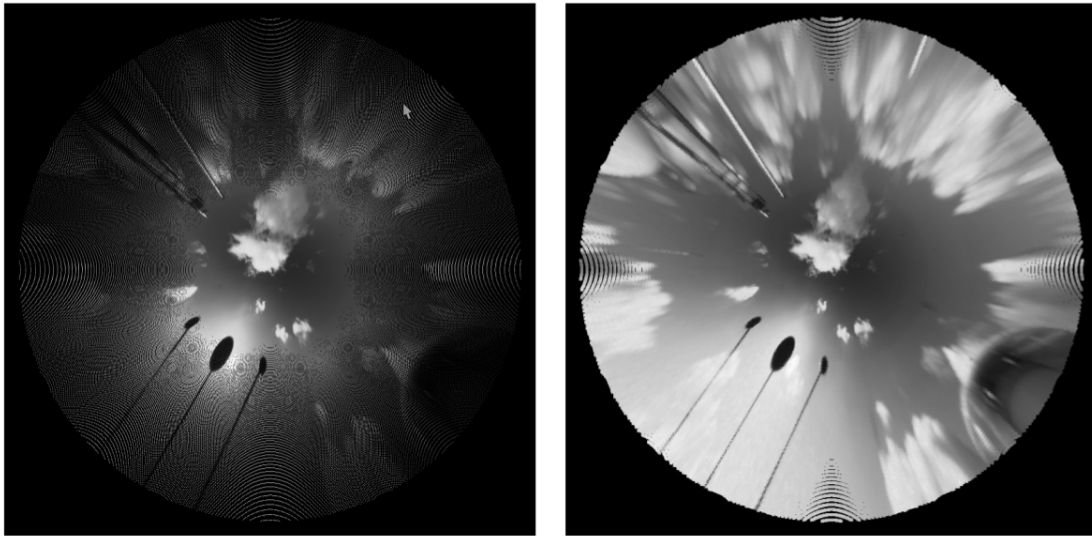


FIGURE 5. Ejemplo de interpolación de proyección en el plano horizontal.

Tras proyectar las imágenes esféricas en un plano horizontal el siguiente paso es obtener el movimiento. Se aplica la metodología explicada por Chow et al. (2011), que se fundamenta en el método de *Correlación Cruzada* de fragmentos de una imagen sobre la siguiente. El campo de movimientos obtenido se agrupa según el ángulo mediante la técnica de *k-means*. El grupo mayoritario establece la dirección. La media de los desplazamientos del grupo elegido es el módulo del desplazamiento.

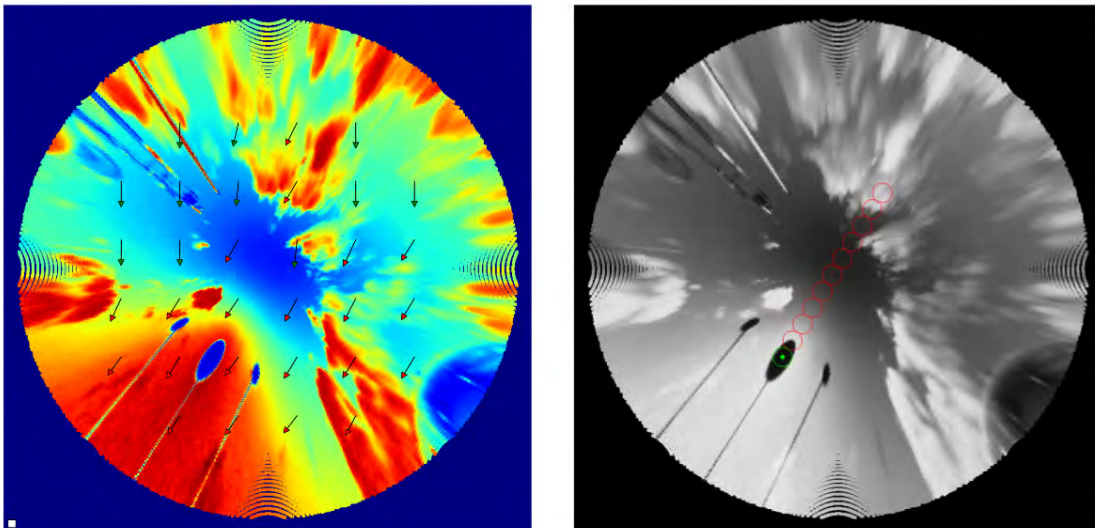


FIGURE 6. Tras hacer la correlación cruzada, cada fragmento de la imagen da un movimiento. Se agrupa por ángulo según *k-means* (figura de la izquierda). La dirección preferente se establece como la del movimiento de nubes. Se desplaza el sol y se predice en función de las nubes o cielo despejado encerrado por cada círculo rojo (imagen de la derecha), sobre la imagen de clasificación.

La predicción se realiza sobre la imagen de clasificación proyectada en el plano. Según la posición predicha para el Sol en instantes futuros, el valor de la predicción se toma como el promedio de los píxeles que rodean a las posiciones predichas para el Sol. Hay obstrucción en caso de presencia de nube en la posición futura del Sol. No la hay en caso contrario.

Las predicciones se comprueban mediante comparación con medidas de Transmitancia Hemisférica, (K_t) definida como el cociente entre Irradiancia Global ($I_{gl,H}$) e Irradiancia Solar Extraterrestre ($I_{ext,H}$) sobre superficie horizontal. La $I_{gl,H}$ es muy sensible a obstrucciones del disco solar, variando mucho su valor en ese caso. Tomando un umbral para K_t de 0.65 se asume que cuando el valor cae por debajo de 0.65 hay obstrucción. No existe en caso contrario.

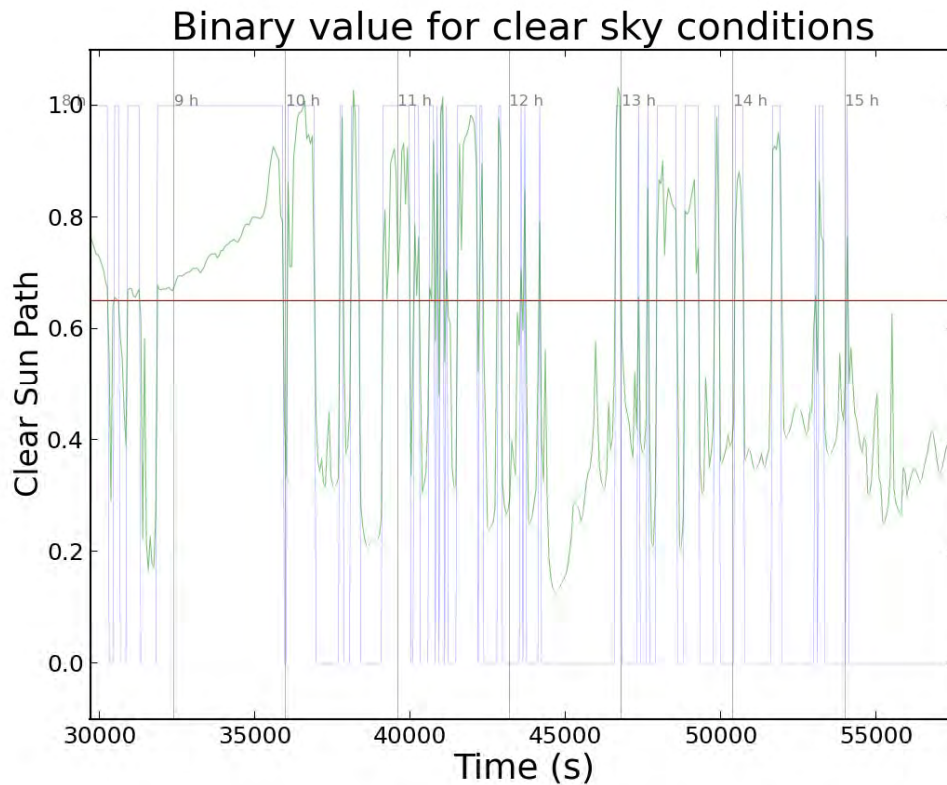


FIGURE 7. Se comprueba la predicción en función del valor de la Transmitancia Hemisférica (K_t) respecto a un valor umbral tomado como 0.65. Valores mayores implican no obstrucción del disco solar por efecto de las nubes. Valores menores indican obstrucción. Esta representación muestra la gran variabilidad de la cobertura nubosa que tuvo lugar este día.

Cada predicción se califica mediante un valor numérico que indica su fiabilidad, llamado *flag de predictibilidad*. Para generarlo se usan las predicciones sobre ese instante de las diez imágenes anteriores.

RESULTADOS

Mejoramos a igualamos los resultados de los artículos anteriores (table 1).

TABLE 1. Éxito en la predicción.

Day	Prediction time (min)	Prediction success (%)
16/11/2012	2	92
23/11/2012	3	84
26/11/2012	2	100
28/11/2012	3	68
29/11/2012	2	77
30/11/2012	2	80
05/12/2012	4	74
10/12/2012	7	70
14/12/2012	4	93

El flag de predictibilidad funciona, aumentando el éxito en la predicción a medida que aumenta el valor del flag. (figure)

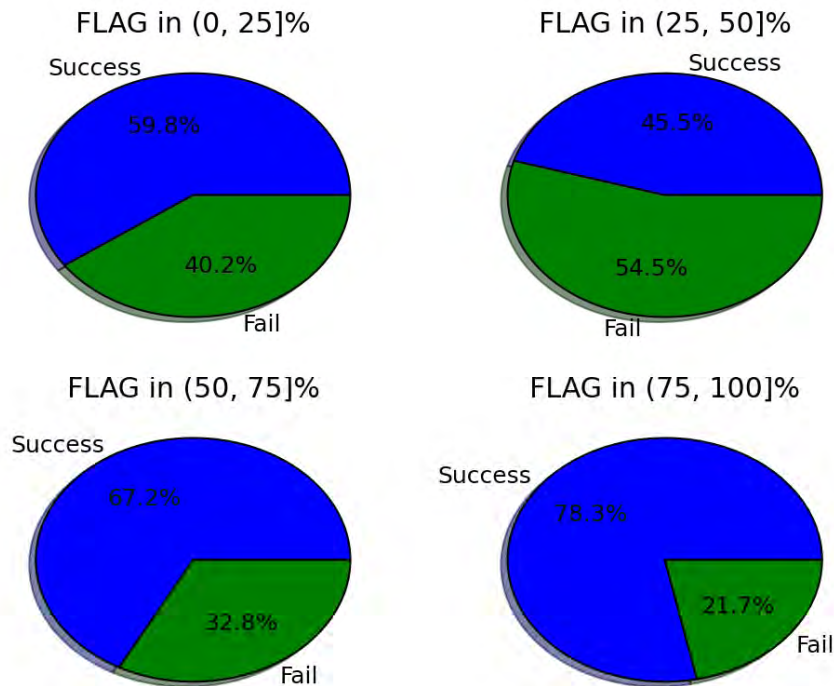


FIGURE 8. El valor asignado a la predicción es relevante a la hora de medir el éxito. Cuanto más alto es el valor del flag, más estable es la predicción entre las imágenes y el porcentaje de acierto aumenta.

DISCUSIÓN

En cuanto a los resultados, en todos los casos el éxito en la predicción es superior al 70 %, para el horizonte temporal más preciso. Las predicciones realizadas a intervalos muy cortos o muy largos son las menos exitosas. A corto plazo se debe a la clasificación errónea del algoritmo de detección de nubes. En la zona circumsolar el brillo en la imagen es muy alto, lo que hace que clasifique siempre como nubosa. A horizontes temporales por encima de siete minutos, la variabilidad de la forma de nube y los procesos de creación/disipación, hacen que el porcentaje de éxito caiga por debajo del 60 %.

El éxito en la predicción más alto depende de la variabilidad de la cobertura nubosa, como concluye Chow et al. (2011).

Los valores crecientes de éxito en la predicción para valores mayores del flag de predictibilidad validan a ese parámetro como una medida de la calidad y fiabilidad de la predicción.

Los objetivos propuestos han sido alcanzados proporcionando resultados que, en el peor de los casos, igualan los obtenidos en trabajos previos. Se ha desarrollado un software para el procesado de imágenes del TSI que automatiza:

- La detección de la posición del Sol en una secuencia de imágenes.
- La proyección de la imagen de todo el cielo en un plano horizontal.
- La interpolación de la imagen proyectada.
- La determinación de la dirección y desplazamiento de la masa nubosa.
- La medición de la fiabilidad de la predicción en un instante dado.
- La evaluación del éxito global de la predicción y del éxito en función del flag de predictibilidad.

REFERENCES

1. Cazorla A., Olmo F.J., and Alados-Arboledas L. *Development of a sky imager for cloud cover assessment*. J. Opt. Soc. Am. A, 2008, vol. 25, pp. 29–39
2. Chow C.W., Urquhart B., Lave M., and Dominguez A. *Intra-hour forecasting with a total sky imager at the uc san diego solar energy testbed*. Solar Energy, 2011, vol. 85, pp. 2881–2893
3. Marquez R. and Coimbra C.F.M. *Intra-hour dni forecasting based on cloud tracking image analysis*. Solar Energy, 2013, vol. 91, pp. 327–336.