

GISch: Planificación de Observaciones en la red de Telescopios GLORIA

Carmen López-Casado^{a,*}, Carlos J. Pérez del Pulgar^a, Víctor F. Muñoz Martínez^a, Alberto J. Castro Tirado^{b,a}

^aDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (Unidad Asociada de I+D+i al CSIC), Universidad de Málaga, Escuela de Ingenierías Industriales. C/ Doctor Ortiz Ramos s/n., 29071 Málaga, España

^bDepartamento de Física Estelar, Instituto de Astrofísica de Andalucía, Glorieta de la Astronomía s/n, 18008 Granada, España.

Resumen

Este artículo propone el diseño y desarrollo de un planificador para la red de telescopios GLORIA. Esta red, cuyo principal objetivo es acercar los ciudadanos a la astronomía, está formada por 18 telescopios ubicados en cuatro continentes. Parte de la gestión de esta red se lleva a cabo por el planificador, que se encarga de recibir peticiones de observación de usuarios y enviárselas a uno de los telescopios de la red. Para esto, necesita un algoritmo que decida el mejor telescopio, evitando ofrecer una petición a un telescopio que finalmente no pueda ejecutarla. Este artículo presenta dos algoritmos de decisión: el primero se basa únicamente en la predicción meteorológica, y el segundo emplea lógica difusa e información de cada telescopio. Ambos algoritmos fueron implantados en la red GLORIA. Los resultados obtenidos, así como una comparativa del rendimiento de ambos se presenta en este artículo. Así mismo, se detalla la arquitectura del planificador basada en una estructura híbrida distribuida-centralizada.

Palabras Clave:

red, telescopios, algoritmos de planificación, lógica difusa, software.

GISch: Observation Plan Scheduler for the GLORIA Telescope Network.

Abstract

This paper proposes the design and development of a telescope network scheduler for the GLORIA telescope network. This telescope network, which main objective is helping users to get involved in astronomy research, is composed by 18 heterogeneous telescopes located in different countries. These telescopes are managed by the scheduler to execute the observations requested by the users. A key module of this scheduler is the telescope decision algorithm which objective is to avoid serving an observation to a telescope that cannot execute it. This paper proposes two different algorithms: the first one is based on weather forecast, and the other one is based on fuzzy logic. Both algorithms were deployed and used into the GLORIA network, an analysis of the results and a performance comparative between both algorithm are shown in this paper. As well, the scheduler architecture based on a hybrid distributed-centralised schema is detailed.

Keywords:

network, telescopes, scheduling algorithms, fuzzy logic, software.

1. Introducción

A lo largo de las últimas décadas se ha producido un aumento en la creación de redes que permiten el acceso a recursos remotos (Andújar Márquez and Mateo Sanguino, 2010) por parte de usuarios que de otra forma no tendrían acceso a éstos. En particular, las redes de telescopios han crecido bastante debido al gran interés que existe en acercar la astronomía a los estu-

diantes y a la ciudadanía en general (Castro-Tirado et al., 2014; Gresham et al., 2016; Panetta, 2016). Este tipo de redes convive con otras dirigidas exclusivamente a astrónomos profesionales en las que se combina información procedente de los distintos telescopios. Tal es el caso de la red HatSouth (Bakos and Gaspar, 2016), 'The Cherenkov Telescope Array' (CTA) (Bigongiari and Consortium, 2016), la red BOOTES (Castro-Tirado et al.,

*Autor para correspondencia: mclopezc@uma.es

To cite this article: Carmen López-Casado, Carlos J. Pérez del Pulgar, Víctor F. Muñoz Martínez, Alberto J. Castro Tirado. 2018. GISch: Observation Plan scheduler for the GLORIA Telescope Network.. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 15, 339-350.

<https://doi.org/10.4995/riai.2018.8640>

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4,0 International (CC BY-NC-ND 4,0)



Figura 1: Localización geográfica de los telescopios de la red GLORIA.

1999, 2012) o la red TAROT (Boër et al., 2017). La primera es utilizada para descubrir exoplanetas que orbitan alrededor de estrellas visibles desde el hemisferio Sur. La red CTA y la red BOOTES han sido concebidas para el análisis de estallidos de rayos gamma (Jelínek et al., 2016); mientras que la red TAROT incluye, además de lo anterior, el descubrimiento de supernovas y el seguimiento de basura espacial. Por otro lado, también existen redes de telescopios que hacen convivir tanto su faceta profesional como la amateur. Un ejemplo es el observatorio Global de Las Cumbres (LCOGT) (Volgenau and Boroson, 2016). Esta red formada por 18 telescopios combina observaciones estáticas, en las que se observa un objeto en un instante determinado de tiempo, y lo que se ha llamado astronomía en el dominio del tiempo, observación de fenómenos astronómicos a lo largo del tiempo.

La mayor parte de las redes de telescopios existentes son homogéneas (Ocaña et al., 2016; Zimmer et al., 2015), es decir, la instrumentación de la que se compone cada telescopio es exactamente igual. De esta manera, se obtienen resultados equivalentes independientemente del telescopio empleado para la observación. Sin embargo, algunas de estas redes son heterogéneas, diseñadas con una instrumentación diferente. Un ejemplo es el caso de LCOGT (Pickles et al., 2014), donde se emplearon telescopios con distinta apertura, pero localizados en el mismo observatorio. Esto les permitió una mejor monitorización de objetos que varían en el tiempo.

En estas redes, los usuarios realizan peticiones de observación que deberán incluir toda la información necesaria. En una petición se puede encontrar información relacionada con el objeto a observar: su nombre o coordenadas astronómicas, magnitud, campo de visión (FoV), etc. así como posibles restricciones: distancia mínima y altura máxima a la Luna, altura mínima del objeto con respecto al horizonte, masa de aire, etc.

La gestión de las peticiones de observación, que se envían a estas redes de telescopios, está supeditada normalmente a un planificador que es el encargado de su coordinación. Este planificador puede estar distribuido por la red o bien centralizado. En redes distribuidas (Racero et al., 2015), normalmente aparece un nodo central que toma la decisión de a qué telescopio

enviar la petición y éstos planifican individualmente todas las peticiones recibidas. Por otro lado, en las redes centralizadas (Saunders et al., 2014) el nodo central planifica y ejecuta todas las peticiones, actuando los telescopios como meros secuenciadores: recibiendo instrucciones y ejecutándolas. La mayoría de las redes de telescopios, independientemente del tipo que sean, siguen un esquema de planificación basado en crear una batería de observaciones para un período de tiempo determinado, normalmente una noche. La elección del orden de las observaciones es un problema de optimización que puede ser resuelto de diversas formas: algoritmos genéticos (Sosnowska et al., 2014), programación lineal en enteros mixta (Solar et al., 2016), etc. Sin embargo, éste no es el único método propuesto de planificación. Existe otra tendencia que se basa en puntuar todas las observaciones pendientes en cada instante de ejecución. Esta puntuación se realiza siguiendo una métrica determinada que normalmente depende de las restricciones especificadas en la petición de observación (Delgado and Reuter, 2016). De manera que la siguiente observación a ejecutar es la que ha obtenido la mejor puntuación.

Tal y como se ha explicado anteriormente, las redes de telescopios existentes se han desarrollado teniendo en cuenta que cada telescopio es empleado de manera exclusiva para unos fines científicos concretos. Sin embargo, la creación de redes heterogéneas permite agrupar telescopios ya existentes que se emplean para fines científicos distintos. En este tipo de redes, los telescopios se emplean de manera compartida entre sus propietarios y la red. De esta manera, se pueden mantener las actividades propias de cada telescopio y generar nuevos campos de actuación conjunta.

El proyecto GLORIA (Castro-Tirado et al., 2014) se puso en marcha a finales de 2014 con la idea de crear una red de telescopios global donde los usuarios pudieran investigar en astronomía realizando observaciones y/o analizando información que otros usuarios hubieran adquirido. Esta red integra telescopios que actualmente están trabajando en diversos campos científicos, creándose de este modo una red heterogénea, con la particularidad de que los telescopios comparten el tiempo de operación entre sus propietarios y la red GLORIA. Como parte

de esta red, se ha diseñado e implantado un planificador distribuido capaz de coexistir e interactuar con el planificador local de cada uno de estos telescopios. Este planificador gestiona todas las peticiones que recibe la red, decide qué telescopio ejecutará cada una de ellas y las envía al planificador local del telescopio seleccionado. El principal objetivo de este planificador es maximizar el número de observaciones ejecutadas por la red, así como minimizar el tiempo que transcurre desde que el usuario solicita la observación y recibe la imagen. En este sentido, se han desarrollado e implantado dos tipos de algoritmos de decisión de telescopio: el primero que únicamente tiene en cuenta la predicción meteorológica; y el segundo, que incluye un modelo de lógica difusa que emplea la información anterior junto con información sobre la observación y cada telescopio.

Este artículo proporciona una descripción de la red GLORIA en el apartado 2, así como la arquitectura del planificador empleado, en el apartado 3. Los diferentes algoritmos desarrollados se describen en el apartado 4. Finalmente, la implantación y los resultados estadísticos sobre el uso de la red se muestran en el apartado 5 y 6. Las conclusiones aparecen en el apartado 7.

2. La red de telescopios GLORIA

La red GLORIA (GLObal Robotic telescope Intelligent Array) integra 18 telescopios extendidos a lo largo de cuatro continentes y ubicados en ambos hemisferios (figura 1). Este conjunto de telescopios incluye tanto telescopios solares como nocturnos, con distintas características ópticas (Tabla 1).

Tabla 1: Características de los telescopios de la red GLORIA.

Telescopio	Apertura (m)	Dist. focal (mm)
BOOTES-1	0.3	1775
BOOTES-2	0.6	4475
BOOTES-3	0.6	4475
CAB-CEB	0.5	5000
CAB-CAHA	0.5	5000
BART	0.25	1640
FRAM	0.3	3048
Pi of the Sky 1	0.07	85
Pi of the Sky 2	0.07	85
WATCHER	0.4	5881
CATA 500	0.5	
OM (solar)	0.25	2500
TADs (solar)	0.25	3020
TADn	0.25	3020
D50	0.5	1975
FAVOR	0.15	1800
TORTORA	0.07	85
REM	0.6	4475

El objetivo de esta red es atraer a un gran número de usuarios hacia el campo de la astronomía, de manera que “cuantos más ojos miren hacia el cielo, más y mayores descubrimientos se lograrán”. Gracias a lo que se conoce como *e-science* o ciencia ciudadana (Wang et al., 2010), toda la información generada

por esta red, se podría compartir y analizar por los usuarios de la misma, acelerando así posibles descubrimientos astronómicos.

La red GLORIA está disponible para todos los ciudadanos en general, incluyendo astrónomos profesionales y amateurs, poniendo a su disposición los telescopios y datos obtenidos de la misma. En el caso de astrónomos profesionales, GLORIA puede ser de gran utilidad para aquéllos que no disponen de instalaciones astronómicas a su alcance. Además, permite darles acceso a telescopios en ubicaciones remotas en las que podrían observar objetos no visibles desde su localización. En cuanto a astrónomos amateurs, GLORIA posibilita el acceso a telescopios profesionales a usuarios que normalmente no tendrían acceso a éstos.

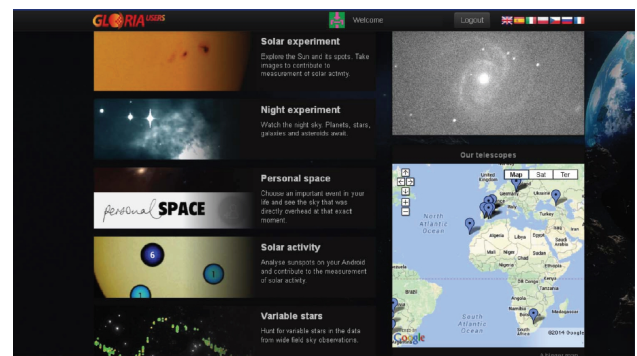


Figura 2: Interfaz web para elegir los experimentos disponibles a través de la red GLORIA.

Para conseguir esto, se desarrollaron dos tipos diferentes de experimentos que se pueden apreciar en la figura 2. Los dos primeros se corresponden con experimentos del tipo *on-line*, en los que se emplea un telescopio para llevar a cabo una observación, y los tres últimos se corresponden los experimentos denominados *off-line*, en los que se emplea información previamente obtenida por la red. El primero de los experimentos *off-line*, denominado *Personal Space*, permite contemplar el cielo tal cual era en una fecha y ubicación determinada. Para esto, la red empleó otras fuentes de imágenes astronómicas. El segundo experimento, denominado *Actividad Solar* permite analizar las manchas solares y el cálculo del número de Wolf mediante la valoración de éste por parte de los usuarios. Por último, el experimento denominado *Estrellas variables* permite analizar la curva de luz de las estrellas e identificar estrellas variables, es decir, estrellas que experimentan una variación en su brillo o fluctúan con el transcurso del tiempo.

En cuanto a los experimentos *on-line*, éstos se dividen en dos categorías: interactivos y planificados (*batch*). Los primeros permiten teleoperar directamente un telescopio por parte de los usuarios. Para ello, éstos deben reservar desde el portal web de la red un telescopio. Una vez que se accede a él, el usuario tendrá el control de todos los elementos del mismo en tiempo real: podrá mover la montura a unas coordenadas u objeto específico, cambiar los filtros, enfocar, seleccionar el tiempo de exposición y tomar una imagen. Por otro lado, el experimento planificado, cuya interfaz web aparece en la figura 3, consiste en realizar una petición de observación a la red con una serie de parámetros concretos, y que ésta la realice automáticamente. Los parámetros de la observación incluyen tanto un bloque de instrucciones como un apartado de restricciones. El primero

contiene toda la información necesaria para que se pueda ejecutar la observación: el objeto a observar, definido a través de sus coordenadas RADEC o su nombre, el filtro a utilizar y el tiempo de exposición de la observación.

The screenshot shows the 'Request an observation' form on the GLORIA Batch Experiment website. It includes a grid of object selection cards, a '2. Constraints' section with various input fields for filters, exposure time, expositions number, moon distance, moon altitude, object altitude, and advanced options like seeing, FoV, and preferred telescopes. The bottom section is '3. Confirm your observation' with a 'Confirm' button. The footer contains acknowledgments, licenses, and partner logos.

Figura 3: Interfaz web del experimento *batch* de la red GLORIA en el que se muestran todos los parámetros que puede completar el usuario.

Por otro lado, el bloque de restricciones incluye tanto restricciones de tiempo, fijas y de visibilidad. Las restricciones de tiempo definen cuándo la observación debe realizarse, se definen parámetros como 'no antes de una fecha concreta', número de días transcurridos desde Luna nueva, etc. Por otro lado, las restricciones fijas acotan el telescopio/observatorio que finalmente ejecutará la observación, dentro de este tipo de restricciones se incluye la escala de píxeles de la cámara, campo de visión (FoV), etc. Finalmente, las restricciones de visibilidad son parámetros dinámicos que determinan cómo el objeto debe ser observado en relación a su posición en el cielo, por ejemplo: altitud mínima del objeto a observar, distancia a la Luna, etc.

Para mejorar la experiencia de los usuarios, el experimento planificado incluye algunos parámetros avanzados, enmarcados en fondo blanco en la figura 3. Estos parámetros son utilizados principalmente por astrónomos profesionales, mientras que los básicos permiten a los astrónomos amateurs trabajar más fácilmente. Dentro de estos parámetros avanzados cabe destacar el asociado al tiempo de exposición, éste fija el tiempo en el que el obturador de la cámara permanecerá abierto para tomar la imagen. Es un parámetro sencillo de utilizar para aquellos usuarios no expertos. Sin embargo, los astrónomos profesionales suelen preferir trabajar con parámetros tales como la magnitud del objeto (información sobre el brillo del mismo) y la relación señal-ruido (SNR). Los astrónomos fijarían estos dos parámetros al realizar la petición de la observación, y el planificador, teniendo en cuenta parámetros internos de la cámara, calcularía el tiempo de exposición asociado al telescopio elegido (Falomo et al., 2011). A modo de resumen, la tabla 2 detalla todos los parámetros necesarios para completar la petición de la observación, incluyendo la distinción entre básicos y avanzados.

Una vez enviada la petición de observación, la red GLORIA, a través de un planificador central, deberá decidir a qué telescopio enviar la observación. Una vez realizada ésta, el usuario podrá descargar la imagen obtenida. Con el fin de mejorar la experiencia del usuario en este tipo de experimentos, la prioridad para el planificador es maximizar el número de peticiones realizadas y su calidad. Además, resulta interesante minimizar el tiempo transcurrido desde que se solicita hasta que se ejecuta la petición tal y como ocurre en otras redes de telescopios. La forma en la que se han optimizado estos criterios dentro de la red GLORIA es lo que se detalla en el resto de este artículo.

3. GISch: Planificador de observaciones

Tal y como se ha comentado anteriormente, la mayoría de las redes de telescopios que actualmente están en uso, o tienen prevista su puesta en marcha en un corto plazo de tiempo, tienen una característica en común: los telescopios que las componen se emplean de manera exclusiva por la red, y son gestionados a través del mismo sistema de control. Sin embargo, uno de los puntos clave de la red GLORIA es que el uso del telescopio es compartido entre la red y el propietario del mismo. La idea es que los propietarios puedan ceder un porcentaje de tiempo del telescopio a la red. Esta coexistencia privada y pública hace que el sistema de control y planificación, que normalmente será diferente para cada telescopio, no se pueda modificar. Este hecho hace que la red GLORIA sea heterogénea, no sólo porque los telescopios tienen diferentes características (Tabla 1), sino

Tabla 2: Parámetros de la petición de observación.

	Parámetro	Tipo	Descripción	
Restricciones	Visib.	Distancia a la Luna	Básico/avanzado	Distancia mínima entre el objeto a observar y la Luna
		Altitud de la Luna	Básico/avanzado	Altitud máxima de la Luna
		Masa de aire	Avanzado	Cantidad de atmósfera atravesada por un rayo de luz del objeto
	Tiempo	Altitud del objeto	Básico	Altitud mínima del objeto a observar
		”No antes de”	Avanzado	Fecha a partir de la cual se puede realizar la observación
		”No después de”	Avanzado	Fecha máxima para realizar la observación
Fijas	Días desde Luna Nueva	Avanzado	Días transcurridos desde Luna nueva para realizar la observación	
	Escala de pixeles	Avanzado	Escala de pixeles de la cámara del telescopio	
	Visibilidad astronómica	Avanzado	Parámetro que informa sobre el efecto distorsionador de la atmósfera	
Instrucciones	FoV	Avanzado	Campo de visión de la cámara del telescopio	
	RADEC del objeto	Avanzado	Posición del objeto a observar en coordenadas ecuatoriales	
	Nombre del objeto	Básico	Nombre del objeto a observar	
	SNR	Avanzado	Relación señal a ruido	
	Magnitud	Avanzado	Magnitud del objeto a observar	
	Tiempo de exposición	Básico	Tiempo de exposición de la cámara del telescopio	
Filtro	Básico/avanzado	Filtro a utilizar en la observación		

porque también existen distintos sistemas de control y planificación para su gestión: RTS2 (Kubánek, 2016), ACP (Denny, 2011), etc. Además, para combinar la existencia de un planificador de red que gestione todas las peticiones realizadas por los usuarios, y a la vez mantener la autonomía de cada uno de los telescopios por separado, el planificador local del telescopio se debe tener en cuenta como parte del sistema de planificación de la red.

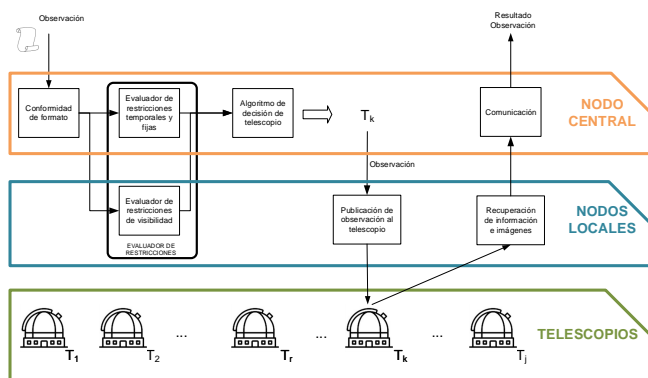


Figura 4: Esquema de decisión del planificador Glsch.

Teniendo en cuenta las restricciones mencionadas anteriormente, el planificador de GLORIA (*Glsch*) se basa en una arquitectura híbrida distribuida-centralizada de tres capas como se muestra en la figura 4. La capa más alta la compone un único nodo, el nodo central, que se encarga de recibir todas las peticiones de los usuarios. Por cada petición recibida, realiza un primer análisis y establece comunicación con los nodos locales. Éstos forman el segundo nivel de la arquitectura y van asociados uno a uno a cada telescopio. Estos nodos realizan un análisis de la visibilidad del objeto a observar. Posteriormente le comunican el resultado al nodo central, quien finalmente decidirá qué telescopio debe ejecutar la observación. Una vez asignado el plan de observación, el nodo local se comunica con el propio planificador del telescopio y envía el plan de observación en el formato admitido por éste. El planificador de los

telescopios compone el nivel más bajo de la arquitectura y es el que realmente ejecutará la observación.

A continuación se va a detallar todo este proceso de gestión de peticiones, desde que son generadas a través del experimento planificado hasta que son ejecutadas o no por un telescopio de la red GLORIA.

3.1. Proceso de gestión de peticiones

El proceso de gestión de peticiones comienza con la recepción de las peticiones de observación. Los usuarios generan peticiones de observación que son gestionadas por el nodo central. El primer paso a realizar por éste es comprobar la conformidad del formato de la petición. Una vez que esto ha sido confirmado, la petición de observación es analizada para obtener una lista de telescopios que puedan ejecutar la observación.

El análisis consiste en una evaluación de las distintas restricciones especificadas en la observación. Como se ha visto en el apartado anterior, las restricciones se dividen en tres clases. Las de tiempo definen una ventana temporal en la que la observación ha de llevarse a cabo. Si la fecha actual está contenida en la ventana temporal definida en la observación, el análisis continúa. Si por el contrario la ventana de tiempo es posterior, la observación se planificará para la fecha de comienzo de la misma. A continuación, se comprueban las restricciones fijas. Éstas son parámetros del telescopio o del observatorio que pueden considerarse constantes, tales como el campo de visión o la escala de píxeles de la cámara. Haciendo una comparación de estas restricciones con los valores propios de las telescopios, se genera una lista de telescopios que los satisfacen. La evaluación de estos dos tipos de restricciones se hace en el nodo central. Sin embargo, las restricciones de visibilidad, que se analizan a continuación, son realizadas por los nodos locales. A cada uno de los nodos locales asociados a los telescopios de la lista que el nodo central acaba de generar, se le transfiere la información necesaria para realizar un estudio de visibilidad. Éste consiste en analizar si el objeto a observar cumple las restricciones de visibilidad y se encuentra por encima del horizonte en algún momento dentro del intervalo de tiempo cedido por el propietario para el uso de la red GLORIA. El propietario define las

franjas temporales en el sistema de control del telescopio, teniendo el nodo local que acceder a esta información para poder efectuar el análisis. Una vez realizado el estudio de visibilidad, el resultado es transferido al nodo central quien actualiza la lista de telescopios disponibles, incluyendo sólo aquellos telescopios que satisfacen tanto las restricciones fijas, las temporales como las de visibilidad.

Algoritmo 1: Asignación de petición a telescopio

Entradas: $O_i = (t, v, f) \leftarrow$ petición de observación i ; $t \leftarrow$ restricciones de fecha; $v \leftarrow$ restricciones de visibilidad; $f \leftarrow$ restricciones fijas;**Salida :** $T_k \leftarrow$ Telescopio elegido;

```

1  $T = \{T_1, T_2, T_3, T_4 \dots T_j\} \in$  telescopios de GLORIA;
2  $\bar{A}_S^i = \emptyset \leftarrow$  lista de telescopios de la observación  $O_i$ ;
3 si formato correcto( $O_i$ ) entonces
4   si  $t$  en intervalo actual entonces
5     para  $T_j \in T$  hacer
6       si  $se\_satisface(f)$  entonces
7          $\bar{A}_S^i = \bar{A}_S^i \cup T_j$ ;
8       fin
9     fin
10    para  $T_j \in \bar{A}_S^i$  hacer
11       $visibilidad =$  Evaluar_visibilidad( $O_i$ );
12      si  $visibilidad == false$  entonces
13         $\bar{A}_S^i = \bar{A}_S^i \setminus T_j$ ;
14      fin
15    fin
16    si  $\bar{A}_S^i > 1$  entonces
17       $T_k =$  decisionTelescopio( $\bar{A}_S^i$ );
18    en otro caso
19       $T_k = \bar{A}_1^i$ ;
20    fin
21    publicacionObservacion( $O_i, T_k$ );
22  si no, si  $t >$  tiempo actual entonces
23    planificar_mas_tarde;
24  en otro caso
25    rechazar( $O_i$ );
26  fin
27 en otro caso
28  rechazar( $O_i$ );
29 fin

```

Posteriormente, el nodo central elige el telescopio que finalmente ejecutará la observación a través del algoritmo de decisión que se explicará en el siguiente apartado. Entonces, el nodo central comunica esta decisión al nodo local asociado quien gestionará la ejecución de la observación en el planificador local del telescopio elegido. Para ello, el nodo local establece una comunicación directa con el planificador local. Esta comunicación se realiza a través de un proceso publicador de datos. Éste se encarga de transformar la petición de observación del planificador GlSch en el formato adecuado del planificador del telescopio. La forma en la que se transfiere la información depende del sistema de control del telescopio y de su propio plani-

ficador: creando y cargando un fichero en un formato concreto (ACP), utilizando un interfaz específico de comunicación para crear y planificar una observación (RTS2), etc. Todo el proceso asociado a la asignación de una observación a un telescopio, que acaba de ser descrito, queda resumido en el algoritmo 1.

Una vez que la observación se ha completado, un nuevo proceso en el nodo local, el proceso recuperador, recibe la información y las imágenes del planificador local. Las imágenes generadas son almacenadas en un repositorio del nodo local y la información es gestionada para informar al nodo central del resultado de la observación que se le había ofrecido.

La observación ofrecida a un telescopio en concreto, puede ser rechazada o no ejecutada por diversos motivos: meteorológicos, problemas en el telescopio, etc. Si esto ocurre, el nodo central debe reasignar la observación a un nuevo telescopio. Si la reasignación se produce en un margen temporal incluido en el estudio de visibilidad que se hizo inicialmente, el proceso consiste en eliminar el telescopio de la lista de telescopios disponibles y elegir otro a través del algoritmo de decisión. En caso contrario, se realizará un nuevo estudio por los nodos locales, actualizándose la lista final de telescopios disponibles.

4. Algoritmo de decisión

La decisión del telescopio candidato a realizar la observación es clave en el proceso de planificación de la red. Una buena elección del telescopio, permitiría que la observación se realizara en el menor tiempo posible, además de maximizar el número de observaciones realizadas con éxito. En este sentido, se puede plantear un problema de optimización multiobjetivo, definido por una función objetivo y otra de coste. La función objetivo del algoritmo sería maximizar el número de peticiones de observación completadas con éxito, es decir, el porcentaje de aceptación de la red. Por otro lado, el coste de la misma es el número de telescopios por los que ha de pasar la observación hasta que uno de ellos finalmente es capaz de ejecutarla. Esto último directamente relacionado con el tiempo que transcurre desde que un usuario realizó una petición de observación y recibió las imágenes correspondientes.

La función objetivo para un grupo de observaciones $\bar{O}_N = \{O_1, O_2, \dots, O_N\}$ y para un número máximo de saltos S , es decir, número máximo de telescopios a los que será ofrecida, queda definida como:

$$T_a(\bar{O}_N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \min \left(1, \sum_{A_j^i \in A_S^i} w(O_i, A_j^i) \cdot d((O_i, A_j^i)) \right) \quad (1)$$

siendo $\bar{A}_S^i = \{A_1^i, A_2^i, \dots, A_S^i\}$ el conjunto de telescopios en los que la observación O_i podría ser ejecutada. $w(O_i, A_j^i) \in \{0, 1\}$ y $d((O_i, A_j^i)) \in \{0, 1\}$ son dos funciones, que devuelven un valor binario, indicando si la observación O_i se pudo observar por el telescopio A_j^i debido a las condiciones meteorológicas y a su disponibilidad.

De igual forma, la función de coste para el mismo grupo de observaciones y para un número máximo de saltos S se puede definir como:

$$M(\overline{O_N}) = \left(1 + \sum_{A_j^i \in A_S^i} (1 - w(O_i, A_j^i) \cdot d((O_i, A_j^i))) \right) \quad (2)$$

siendo $M(\overline{O_N})$ el número de pasos en el peor caso asociado a dicho grupo de observaciones. Este parámetro está directamente relacionado con el tiempo transcurrido desde que la observación es solicitada hasta que se ejecuta.

Debido a que la información que proporcionan las funciones $w(O_i, A_j^i)$ y $d((O_i, A_j^i))$ no se conocen hasta el instante en el que la observación O_i se va a ejecutar en el telescopio A_j^i , es imposible resolver este problema a través de técnicas de optimización. Por este motivo, se han definido en este artículo dos algoritmos de decisión que pretenden optimizar las funciones definidas en (1) y (2).

Teniendo esto en cuenta, la decisión del telescopio que finalmente ejecutará la petición de observación, se realiza en la red GLORIA a partir de una lista de telescopios disponibles previamente creada. Esto se define como una función en la línea 17 del Algoritmo 1. En otras redes, esta decisión se realiza mediante algoritmos de optimización, empleando el telescopio como un parámetro más a optimizar dentro del proceso de planificación (Arregui et al., 2012; Lampoudi et al., 2015). En otras ocasiones, la elección del telescopio se realiza previamente por el usuario al generar la petición de observación, creándose baterías de observaciones para cada uno de los telescopios (Racero et al., 2015).

En el caso de la red GLORIA, debido a que cada telescopio posee un sistema de control distinto y un planificador local propio, el momento exacto en el que se ejecutará la observación no puede ser controlado por la red. Por lo tanto, para evitar ofrecer la observación a un telescopio que finalmente no pueda ejecutarla, el algoritmo de decisión se debe diseñar teniendo en cuenta algún tipo de información que permita decidir el telescopio que mejor pueda ejecutar el plan.

En este sentido, inicialmente se diseñó un algoritmo más sencillo basado únicamente en la predicción meteorológica (Apartado 4.1). Sin embargo, el hecho de que los tiempos de respuesta de los telescopios no fueran fijos, ya que se desconoce el momento en el que la observación se ejecutará por un telescopio; así como la posibilidad de que éste no se ejecute finalmente, hizo plantear un algoritmo, basado en lógica difusa (Apartado 4.2), que tuviera en cuenta parámetros de entrada adicionales.

4.1. Algoritmo de decisión meteorológico

Este algoritmo de decisión tiene en cuenta sólo aspectos meteorológicos para tomar la decisión de qué telescopio ejecutará la observación. Para ello es necesario disponer de la predicción meteorológica para cada una de las ubicaciones de los telescopios.

Existen pocos proyectos libres (Ye, 2011; myweather2, 2017) que proporcionen la predicción meteorológica para una localización específica a través de interfaces de comunicación *Machine to Machine* (M2M). Para este proyecto se eligió el primero, *7timer* (Ye, 2011), ya que éste incluye información específica de astronomía, como puede ser el parámetro *seeing*

que viene dado por la distorsión atmosférica e informa sobre la calidad del cielo en un momento determinado. Este interfaz proporciona la predicción meteorológica en un rango de tres días dividida en intervalos de tres horas. Las peticiones incluyen información sobre nubosidad, velocidad del viento, tipo de precipitación, *seeing*, etc.

El algoritmo de decisión meteorológico recibe la predicción meteorológica para cada telescopio de la lista de telescopios disponibles. Para cada uno de ellos obtiene una calificación en función de las condiciones meteorológicas previstas para el intervalo de tiempo cedido por el propietario para el uso de la red GLORIA. Finalmente, el telescopio con mejor puntuación será elegido. En el caso en el que más de un telescopio obtenga la misma puntuación, el algoritmo considera el número de veces que los telescopios han sido utilizados por la red. En estos casos se elige el que menos haya sido utilizado.

Si se tiene en cuenta la nubosidad, la visibilidad astronómica y la existencia o no de precipitación, ya sea en forma de lluvia, nieve o granizo, la fórmula para obtener la puntuación de un telescopio (ϕ) es:

$$\phi = \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right)\beta \quad (3)$$

siendo α la predicción meteorológica y β la visibilidad astronómica. La predicción meteorológica es un parámetro que incluye información sobre la nubosidad y la existencia o no de precipitación en la localización del observatorio. Su rango de valores se define del 0 % al 100 %. Cero indica que el cielo está totalmente despejado, sin ningún tipo de precipitación ni nubes; conforme el tiempo va empeorando, este valor aumenta. Este parámetro se calcula según (4):

$$\alpha = 100 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - \delta_i) \frac{\tau_i}{10} \quad (4)$$

donde N es el número de intervalos de tres horas considerados en función del tiempo de disponibilidad del telescopio en cuestión; δ_i una variable binaria cuyo valor es 0 cuando existe precipitación de cualquier tipo y 1 cuando no hay precipitación para el intervalo de tiempo i ; y τ_i es una variable entera que indica en un rango del 0 al 10 el nivel de nubosidad en el intervalo i . Estos valores son directamente obtenidos a través del interfaz M2M proporcionado por *7timer*.

El parámetro de visibilidad (β) informa sobre la transparencia astronómica en la localización del observatorio. Puede tomar valores entre el 0 % y 100 %, correspondiéndose el valor mayor a una mejor condición de transparencia y visibilidad en el observatorio. Este parámetro se calcula según (5):

$$\alpha = 100 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{\xi}{10}\right) \quad (5)$$

donde ξ es una variable entera que indica en un rango del 1 al 10 el valor del *seeing* en el observatorio en los intervalos considerados. Conforme este valor aumenta, el *seeing* es peor. Estos valores son directamente obtenidos a través del interfaz M2M proporcionado por *7timer*.

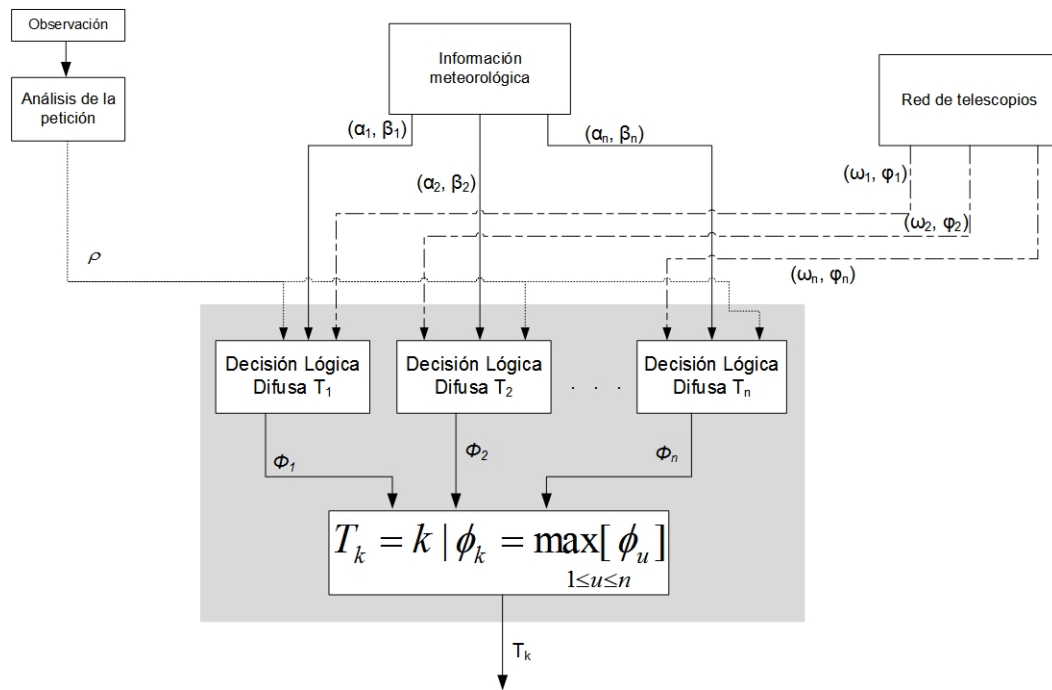


Figura 5: Esquema del algoritmo de decisión basado en lógica difusa.

4.2. Algoritmo de decisión basado en lógica difusa

Este algoritmo de decisión utiliza un modelo de lógica difusa para puntuar a cada uno de los telescopios disponibles. La figura 5 muestra un esquema del algoritmo planteado. Tal y como se puede apreciar, se ha empleado un modelo difuso para cada uno de los telescopios. Este modelo tiene como entrada tres tipos de parámetros: información meteorológica, calidad de la observación del objeto e información de la red; y como salida la puntuación de cada telescopio ϕ_i .

Los parámetros asociados a la información meteorológica informan sobre las condiciones atmosféricas en el observatorio. Estos datos han sido obtenidos de *7timer* tal y como se ha explicado anteriormente.

Tabla 3: Funciones miembros del modelo de lógica difusa.

	Valor	Intervalo	Tipo
α	despejado	0-10	triangular
	nuboso	0-50	triangular
	lluvioso	45-100	trapezoidal
β	bajo	0-40	triangular
	medio	10-90	triangular
	alto	60-100	triangular
ω	bajo	0-60	triangular
	medio	55-83	trapezoidal
	alto	77-100	trapezoidal
ρ	bajo	0-29	triangular
	medio	27-67	trapezoidal
	alto	63-100	trapezoidal
φ	bajo	0-60	triangular
	medio	35-70	triangular
	alto	60-100	trapezoidal
ϕ	bajo	0-40	triangular
	medio	14-86	trapezoidal
	alto	64-100	trapezoidal

El parámetro utilizado para medir la calidad es la *Altitud de Tránsito del Objeto* (ρ). Este parámetro informa sobre la máxima altitud que puede alcanzar el objeto visto desde el observatorio, en un rango de 0° a 90° . Cuanto mayor es el valor de la altitud, mejor será la observación desde la localización del observatorio ya que el objeto se observará en el zenit del telescopio. Este parámetro se obtiene a partir de herramientas tales como Sky-Map (Sky-Map, 2017).

Finalmente, hay dos parámetros de la red que se realimentan para incluir información sobre el comportamiento de los telescopios. Por un lado está la *Puntuación del usuario* (φ), en un rango del 0% al 100%. Este parámetro informa sobre la puntuación que los usuarios de la red GLORIA han dado al telescopio que ha realizado la observación. Por otro lado, también se tiene en cuenta la *Tasa de aceptación del telescopio* (ω). Este parámetro se define como el porcentaje de observaciones completadas frente al total de las ofrecidas al telescopio (0-100%).

El algoritmo de lógica difusa se basa en la definición de una serie de reglas lógicas que relacionan entradas con salidas a través de un conjunto de variables que atiende a criterios de significado y no de magnitud (Trillas and Eciolaza, 2015). Para esto, se han definido los elementos que aparecen en la tabla 3 en base a los parámetros anteriores.

Debido al elevado número de parámetros de entrada, el número de reglas lógicas han sido reducidas tomando como valor de entrada clave la previsión meteorológica. Si ésta no es adecuada en la localización del telescopio, el sistema de control, previsiblemente, hará que el telescopio esté cerrado y por tanto cualquier observación enviada al mismo no se ejecutará. Por tanto, el número de parámetros de entrada a tener en cuenta en las reglas depende altamente del valor de la predicción meteorológica (6).

$$IF \alpha = lluvia THEN \phi = bajo \tag{6}$$

Conforme la previsión mejora, pero sin llegar a ser despejado del todo, las reglas del algoritmo incluyen información sobre el resto de parámetros, a excepción del parámetro visibilidad astronómica que sólo es relevante cuando el tiempo está despejado (7).

$$\begin{aligned}
 \text{IF } \alpha = \text{nuboso AND } \omega = u_1 \\
 \text{AND } \rho = u_2 \\
 \text{AND } \varphi = u_3 \\
 \text{THEN } \phi = y
 \end{aligned}
 \quad (7)$$

La tabla 4 resume el rango de puntuación de los telescopios en este caso. Cabe destacar que el guión indica que la entrada podría tomar cualquier valor del conjunto difuso.

Tabla 4: Puntuación de los telescopios con previsión nubosa

u_1	u_2	u_3	y
-	bajo	-	bajo
medio/alto	alto	medio/alto	medio

Finalmente cuando la previsión meteorológica es despejada, la información del parámetro visibilidad astronómica se incluye (8). En la tabla 5 aparece el resumen de las puntuaciones para este caso.

$$\begin{aligned}
 \text{IF } \alpha = \text{despejado AND } \omega \in u_1 \\
 \text{AND } \rho = u_2 \\
 \text{AND } \varphi = u_3 \\
 \text{AND } \beta = u_4 \\
 \text{THEN } \phi = y
 \end{aligned}
 \quad (8)$$

Tabla 5: Puntuación de los telescopios con previsión despejada

u_1	u_2	u_3	u_4	y
medio	medio	medio	medio/alto	medio
medio/alto	alto	medio/alto	medio/alto	alto
alto	medio/alto	medio/alto	medio/alto	alto
medio/alto	medio/alto	alto	medio/alto	alto
-	bajo	-	medio/alto	bajo
bajo	-	-	medio/alto	bajo
-	-	bajo	medio/alto	bajo
alto	alto	alto	bajo	medio
medio/alto	medio/alto	medio/alto	bajo	bajo

La figura 6 muestra el comportamiento del modelo de lógica difusa, relacionando la previsión meteorológica con la tasa de aceptación del telescopio (figura 6(a)) y la altitud de tránsito del objeto (figura 6(b)). Como se puede apreciar en la figura 6(a), la valoración del telescopio aumenta conforme ω se incrementa, siempre y cuando el valor de α decazca, es decir, conforme mejor tiempo haga. De la misma manera, en la figura 6(b) se puede observar como en valores de ρ cercanas a 90° , la valoración del telescopio alcanza el máximo cuando α se aproxima a cero.

5. Implantación

El planificador descrito ha sido desarrollado empleando como base el lenguaje de programación JAVA. La figura 7 muestra el diagrama de componentes, a nivel de tecnologías empleadas, de la arquitectura del planificador.

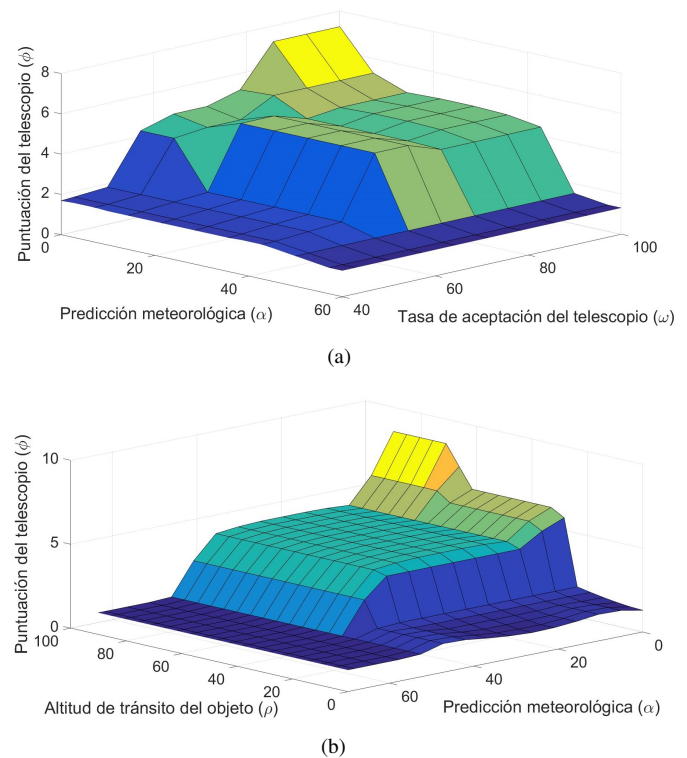


Figura 6: Representación de la variable Puntuación del Telescopio (ϕ) en función de las variables de entrada Predicción meteorológica (α) y (a) Tasa de aceptación del telescopio (ω) o (b) Altitud de tránsito del objeto (ρ).

Las funciones de usuario proporcionadas por el planificador han sido implementadas a través de Servicios Web utilizando SOAP sobre HTTPS para la comunicación entre el experimento *batch* y el nodo central. Los datos correspondientes a la observación solicitada por el usuario son enviados como un documento XML siguiendo un esquema de peticiones XSD. Adicionalmente, el nodo central implementa otro Servicio Web para comunicarse con los nodos locales, siguiendo el mismo esquema de comunicación que con el experimento *batch*. Ambos Servicios Web han sido desplegados en servidores de aplicaciones web (Apache TOMCAT), y utilizan MySQL como base de datos para almacenar todos los datos persistentes asociados. El acceso a MySQL se realiza a través de JDBC e Hibernate (Ottinger et al., 2014).

En cuanto a los nodos locales, proporcionan otro Servicio Web desplegado para la gestión de las observaciones. A través de éste se comunican con el nodo central para intercambiar toda la información asociada a éstas. Sin embargo, para la comunicación con el planificador local del telescopio, se utiliza un proceso Java adaptado al tipo de comunicación específica requerida por el telescopio. Para el caso de un telescopio con RTS2 se intercambian documentos JSON sobre HTTP, y para un telescopio con ACP se utiliza RTML (Remote Telescope Markup Language). Tanto el Servicio Web como el proceso Java utilizan MySQL para el intercambio y persistencia de datos.

6. Resultados

El planificador GISch, descrito anteriormente, se implantó en la red de telescopios GLORIA. Aunque la red GLORIA está

formada por 18 telescopios (Tabla 1), sólo 8 fueron configurados para ser utilizados por el planificador GISch. Estos 8 telescopios son: BOOTES-1 (Jelínek et al., 2016) de la red BOOTES en Huelva; BART (Nekola et al., 2010) ubicado en el instituto astronómico AVČR en Ondřejov (República Checa); Pi of the Sky 1 y 2 (Mankiewicz et al., 2014) pertenecientes al sistema Pi of the Sky y ubicados respectivamente en Chile y Huelva; CATA500 (Hamuy et al., 2012), perteneciente a la universidad de Chile y ubicado en el observatorio Cerro Tololo; FAVOR (Beskin et al., 2005) y TORTORA (Karpov et al., 2016) del Observatorio Astrofísico de Rusia; y finalmente, REM (Ducci et al., 2016) ubicado en el observatorio La Silla en Chile y perteneciente al Instituto Nacional de Astrofísica italiano.

en el caso de utilización del algoritmo de predicción meteorológica.

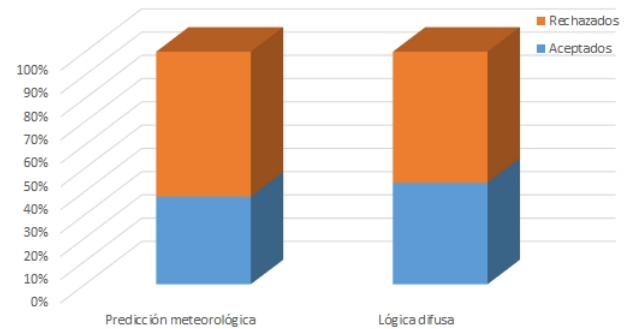


Figura 8: Tasa de aceptación por algoritmo durante el período de evaluación.

Aunque las tasas de aceptación obtenidas son muy similares, la ventaja del empleo del algoritmo basado en lógica difusa aparece al analizar el proceso de reasignación. Tal y como muestra la figura 9, el número de observaciones completadas en un sólo paso de reasignación es sustancialmente superior en el algoritmo de lógica difusa. El porcentaje de observaciones completadas en el primer paso de reasignación pasa del 56 % en el algoritmo de decisión meteorológica, al 77 % en el algoritmo basado en lógica difusa. Este hecho implica que el tiempo medio de ejecución de una observación es inferior en el segundo caso. Utilizando el primer algoritmo, las observaciones completadas tardaron de media 41 horas, sin embargo, al utilizar el algoritmo basado en lógica difusa, este tiempo decreció hasta 27,29 horas.

Para poder hacer una mejor comparación de ambos algoritmos se ha realizado un análisis más detallado, a través de una gráfica que muestra el frente de Pareto de ambos algoritmos, representado en la figura 10. En esta figura se muestra el porcentaje de aceptación, función objetivo (1), frente al número máximo de pasos S , función de coste (2), para diferentes conjuntos de observaciones de tamaño $N = 30$. En esta figura se puede observar como el frente de Pareto, representado con una línea negra en la misma, indica que para un mismo número máximo de pasos, la tasa de aceptación es mucho mejor en el algoritmo de de lógica difusa, llegando a alcanzar el 100 % para el caso de un número de pasos $S = 5$. Además, esta figura indica para cada algoritmo, cuál sería el porcentaje de aceptación de planes en función del número de saltos máximo que se definan. De esta manera se puede apreciar con $S = 3$ se podría alcanzar un 85 % de porcentaje de aceptación y para $S = 5$ se alcanzaría un 100 % en el caso de emplear el algoritmo de lógica difusa.

Por otro lado, como se indicó en el apartado 4.2, los usuarios tuvieron la posibilidad de puntuar los telescopios a través de la calidad de la imagen que éstos toman. Esta puntuación comprende valores entre el 0 y el 10. La figura 11 muestra la puntuación de los telescopios tras finalizar el período de análisis. Puede verse cómo todos los telescopios superan el 5, destacando el telescopio Pi of the Sky 1 que alcanza la máxima puntuación con un 10. También puede observarse como, a pesar de estar incluido en el experimento *batch*, el telescopio FAVOR no aparece en la figura. Durante el período de análisis, este telescopio no realizó ninguna observación, siendo los problemas técnicos en el telescopio el principal motivo.

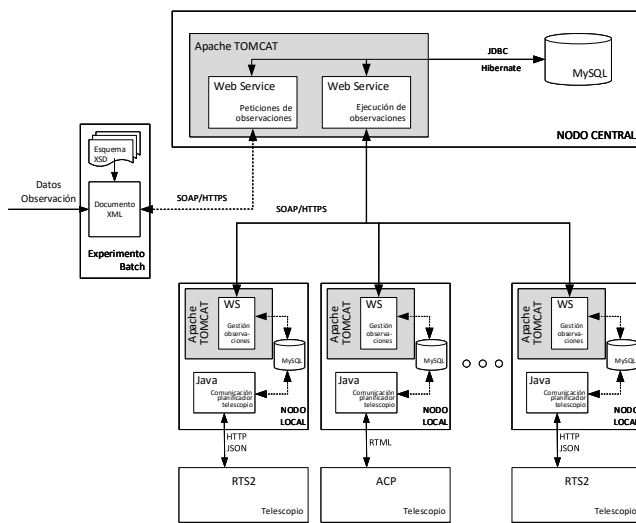


Figura 7: Diagrama de componentes de la arquitectura del planificador GISch.

Para comprobar el funcionamiento del planificador se ha analizado un período de tiempo de 17 meses, comenzando en Abril de 2014. Estos meses comprenden el comienzo de funcionamiento del planificador, de manera que inicialmente se empleó el algoritmo de decisión meteorológica, y posteriormente se cambió al algoritmo basado en lógica difusa. Esta elección permitió comparar el rendimiento de uno y otro. Durante este período de tiempo se enviaron 3.949 observaciones, generadas por 863 usuarios distintos. No todas estas observaciones fueron factibles de ser ejecutadas por alguno de los telescopios disponibles en la red. Las restricciones que se especificaron hicieron que algunos objetos no fueran visible por ninguno de los telescopios. Teniendo en cuenta este hecho, 1.600 observaciones son las que realmente fueron ofrecidas a los telescopios, de las que 632 fueron finalmente completadas con éxito por los mismos, el 39,5 % de las mismas.

De todas las observaciones solicitadas a la red, el 69,31 % se corresponde con el período en el que el algoritmo de decisión meteorológico fue utilizado y el 30,69 % con el algoritmo de decisión basado en lógica difusa. El porcentaje es sensiblemente mayor en el primero de los algoritmos debido a que éste estuvo funcionando más tiempo que el segundo.

En la figura 8 aparece una comparativa de la tasa de aceptación de ambos algoritmos. Se puede observar como en el período en el que el algoritmo de lógica difusa fue utilizado el porcentaje es ligeramente superior: 43,58 %, frente al 37,69 %

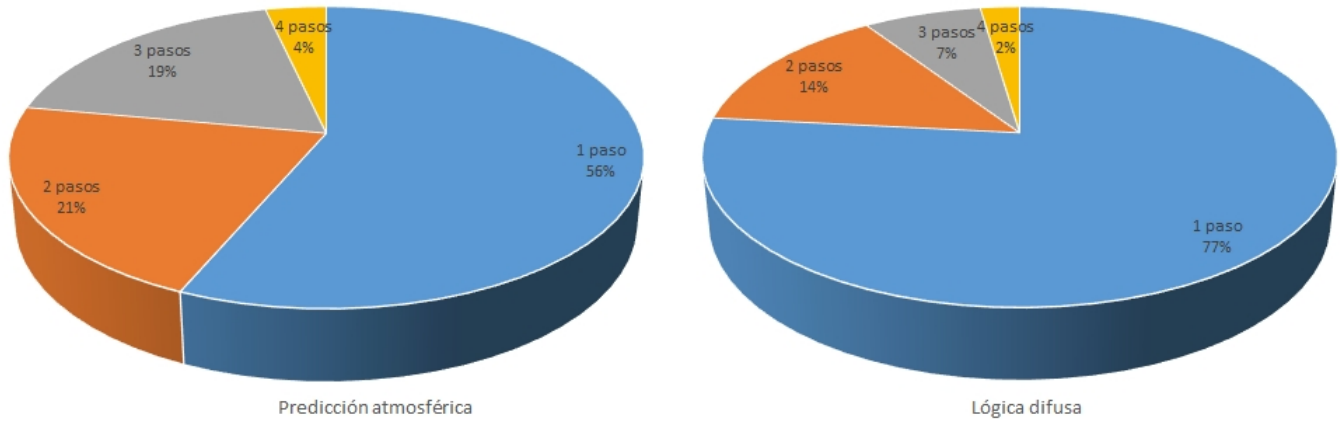


Figura 9: Agrupación de las observaciones completadas en función del número de pasos del proceso de reasignación para cada uno de los algoritmos evaluados.

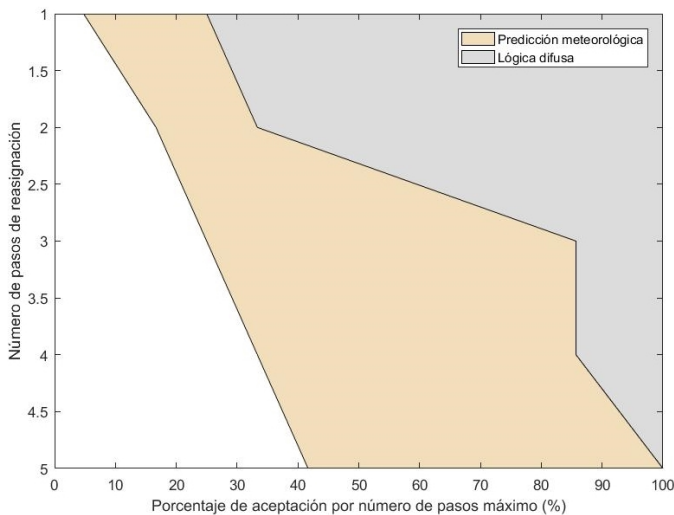


Figura 10: Frente de Pareto para porcentaje de aceptación por número de pasos máximo frente al número de pasos de reasignación.

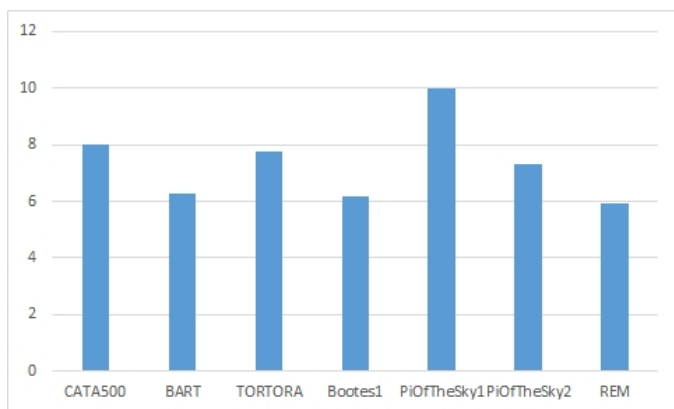


Figura 11: Puntuación de los telescopios durante el período de evaluación.

7. Conclusiones

Este artículo ha descrito el desarrollo del planificador de observaciones GISch, empleado en la red de telescopios GLORIA. Este planificador se ha basado en una arquitectura híbrida

distribuida-centralizada de tres capas en el que se han planteado y comparado dos algoritmos de decisión, con el fin de resolver el problema de optimización multiobjetivos que surge al intentar mejorar el porcentaje de aceptación de observaciones realizando el menor número de saltos de la observación de un telescopio a otro.

El primer algoritmo planteado, más sencillo, se basa únicamente en la predicción meteorológica, y el otro, que es más complejo, se basa en lógica difusa y la realimentación de cierta información del telescopio. Ambos se han implantado en la red GLORIA, y la información obtenida ha permitido realizar una comparativa de ambos algoritmos. En este sentido, se ha visto como a nivel de tasa de aceptación de observaciones, ambos algoritmos muestran resultados equivalentes, siendo el algoritmo de lógica difusa ligeramente superior. Sin embargo si analizamos el proceso de reasignación, que está directamente relacionado con el tiempo de ejecución de una observación, se ha comprobado como el algoritmo de lógica difusa reduce considerablemente el número de pasos de reasignación. Datos corroborados a través de la representación del frente de Pareto para ambos algoritmos.

Como líneas futuras, se plantea emplear algoritmos de aprendizaje computacional que permitan aprender de la red cuál sería el mejor telescopio para una petición de observación concreta, adaptándose a nuevas situaciones, como puede ser una disminución de la tasa de aceptación de un telescopio, la desconexión del mismo, cambios meteorológicos debidos a las diferentes estaciones del año, etc. Por otro lado, los resultados que se muestran en este artículo para ambos algoritmos se han obtenido para un conjunto de observaciones tomadas en diferentes espacios temporales. Esto es debido a que los datos que se muestran son el resultado de la implantación de sendos algoritmos en la red, implantándose primero el algoritmo de predicción meteorológica y posteriormente el algoritmo basado en lógica difusa. Para poder realizar un análisis comparativo más exacto de cada algoritmo, es necesario implantar cada uno de ellos en la red bajo las mismas condiciones, es decir, la meteorología debería ser la misma para cada telescopio, así como la disponibilidad de cada uno. Debido a que esto es imposible de realizar en la práctica, se propone como trabajo futuro el desarrollo de un entorno de simulación, que permita ejecutar

diferentes algoritmos de decisión bajo las mismas condiciones de cada telescopio. De esta manera se podrían validar los diferentes algoritmos de decisión y sus mejoras en las mismas condiciones.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al proyecto GLORIA. GLOBal Robotic telescopes Intelligent Array for e-Science (GLORIA) es un proyecto financiado por la Unión Europea bajo el Séptimo Programa Marco (FP7/2007-2012) bajo la concesión número 283783.

Referencias

- Andújar Márquez, J., Mateo Sanguino, T., 1 2010. Diseño de Laboratorios Virtuales y/o Remotos. Un Caso Práctico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* 7 (1), 64–72.
DOI: 10.1016/S1697-7912(10)70009-1
- Arregui, J. P., Tejo, J. A., Linares López, C., Borrajo, D., 2012. Steps towards and operational sensor network planning for space surveillance. In: *Proceedings of the SpaceOps*.
DOI: 10.2514/6.2012-1294728
- Bakos, G., Gaspar, 2016. Finding and Characterizing a Large and Diverse Population of Transiting Exoplanets with HATSouth in Support of NASA Space Missions. *NASA Proposal #16-XRPI6-70*.
- Beskin, G., Bad'in, V., Biryukov, A., et al., 7 2005. FAVOR (FAst Variability Optical Registration) – A Two-telescope Complex for Detection and Investigation of Short Optical Transients. *Il Nuovo Cimento*, 751–754.
DOI: 10.1393/ncc/i2005-10146-9
- Bigongiari, C., Consortium, C., 2016. The Cherenkov Telescope Array. *Nuclear and Particle Physics Proceedings* 279, 174–181.
DOI: 10.1016/j.nucphysbps.2016.10.025
- Boër, M., Klotz, A., Laugier, R., et al., 2017. TAROT: a network for space surveillance and tracking operations. *7th European Conference on Space Debris ESA/ESOC*.
- Castro-Tirado, A. J., Jelínek, M., Gorosabel, J., et al., 2012. Building the BOOTES world-wide Network of Robotic telescopes. *Astronomical Society of India Conference Series*, Vol. 7, 2012, p. 313-320 7, 313–320.
- Castro-Tirado, A. J., Sánchez Moreno, F. M., Pérez del Pulgar, C., et al., 2014. The GLOBal Robotic telescopes Intelligent Array for E-Science (GLORIA). *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* 45, 104–109.
- Castro-Tirado, A. J., Soldán, J., Bernas, M., et al., 9 1999. The Burst Observer and Optical Transient Exploring System (BOOTES). *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* 138 (3), 583–585.
DOI: 10.1051/aas:1999362
- Delgado, F., Reuter, M. A., 7 2016. The LSST Scheduler from design to construction. *SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation*, 991013.
DOI: 10.1117/12.2233630
- Denny, R., 2011. A Web-Remote/Robotic/Scheduled Astronomical Data Acquisition System. In: *Telescopes from Afar Conference*. p. 47.
- Ducci, L., Covino, S., Doroshenko, V., Mereghetti, S., Santangelo, A., Sasaki, M., 11 2016. Optical and near-infrared photometric monitoring of the transient X-ray binary A0538 with REM. *Astronomy and Astrophysics* 595, A103.
DOI: 10.1051/0004-6361/201629236
- Falomo, R., Fantinel, D., Uslenghi, M., 9 2011. AETC: Advanced Exposure Time Calculator. In: *Teschler, A. G. (Ed.), Applications of Digital Image Processing XXXIV. International Society for Optics and Photonics*, pp. 813523–.
DOI: 10.1117/12.913304
- Gresham, K. C., Palma, C., Polsgrove, D. E., Chun, F. K., Della-Rose, D. J., Tippetts, R. D., 2016. Education and outreach using the falcon telescope network. *Acta Astronautica* 129, 130–134.
DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.09.006
- Hamuy, M., Pignata, G., Maza, J., et al., 2012. The CHilean Automatic Supernova sEarch. *Memorie della Società Astronomica Italiana* 83, 388–392.
- Jelínek, M., Castro-Tirado, A. J., Cunniffe, R., et al., 2016. A decade of GRB follow-up by BOOTES in Spain (2003-2013). *Advances in Astronomy*.
- Karpov, S., Beskin, G., Biryukov, A., et al., 2016. Mini-Mega-TORTORA wide-field monitoring system with sub-second temporal resolution: first year of operation. *IV Workshop on Robotic Autonomous Observatories (Eds. María Dolores Caballero-García, Shashi B. Pandey, David Hiriart & Alberto J. Castro-Tirado) Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias) Vol. 48, pp. 91-96 (2016) 48, 91–96*.
- Kubánek, P., 7 2016. Status, upgrades, and advances of RTS2: the open source astronomical observatory manager. In: *Chiozzi, G., Guzman, J. C. (Eds.), SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, p. 99132U.
DOI: 10.1117/12.2232555
- Lampoudi, S., Saunders, E., Eastman, J., 2015. An integer linear programming solution to the telescope network scheduling problem. In: *International Conference on Operations Research and Enterprise Systems*.
- Mankiewicz, L., Batsch, T., Castro-Tirado, A., et al., 2014. Pi of the Sky full system and the new telescope. *III Workshop on Robotic Autonomous Observatories (Eds. Juan C. Tello, Alberto Riva, David Hiriart & Alberto J. Castro-Tirado) Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias) Vol. 45, pp. 7–11 (2014) 45, 7–11*.
- myweather2, 2017. Free weather API — XML weather and JSON weather feed for global locations.
URL: <http://www.myweather2.com>
- Nekola, M., Hudec, R., Jelínek, M., Kubánek, P., Štrobl, J., Poláček, C., 2010. BART: The Czech Autonomous Observatory. *Advances in Astronomy* 2010, 1–5.
DOI: 10.1155/2010/103986
- Ocaña, F., Ibarra, A., Racero, E., Montero, A., Doubek, J., Ruiz, V., 7 2016. First results of the Test-Bed Telescopes (TBT) project: Cebreros telescope commissioning. In: *Hall, H. J., Gilmozzi, R., Marshall, H. K. (Eds.), SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation*. p. 990666.
DOI: 10.1117/12.2233142
- Ottinger, J., Linwood, J., Minter, D., 2014. *Beginning Hibernate 3rd, 3rd Edition*. Apress Berkely, CA, USA.
- Panetta, M. P., 2016. The EEE Project: An extended network of muon telescopes for the study of cosmic rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 824, 642–643.
DOI: 10.1016/j.nima.2015.10.073
- Pickles, A., Hjelstrom, A., Boroson, T., et al., 8 2014. LCOGT network observatory operations. In: *Peck, A. B., Benn, C. R., Seaman, R. L. (Eds.), SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation*. p. 914912.
DOI: 10.1117/12.2055215
- Racero, E., Ocaña, F., Ponz, D., 2015. Towards an autonomous telescope system: the Test-Bed Telescope project. *Highlights of Spanish Astrophysics*, 828–833.
- Saunders, E. S., Lampoudi, S., Lister, T. A., Norbury, M., Walker, Z., 8 2014. Novel scheduling approaches in the era of multi-telescope networks. In: *Peck, A. B., Benn, C. R., Seaman, R. L. (Eds.), SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation*. p. 91490E.
DOI: 10.1117/12.2056642
- Sky-Map, 2017. Sky-Map.
URL: <http://www.sky-map.org/>
- Solar, M., Michelon, P., Avarias, J., Garces, M., 2016. A scheduling model for astronomy. *Astronomy and Computing* 15, 90–104.
DOI: 10.1016/j.ascom.2016.02.005
- Sosnowska, D., Quadahi, A., Buchschacher, N., Weber, L., Pepe, F., 2014. Using Heuristic Algorithms to Optimize Observing Target Sequences. In: *Astronomical Data Analysis Software and Systems XXIII. Vol. 485*. p. 73.
- Trillas, E., Eciolaza, L., 2015. *Fuzzy Logic*. Springer International Publishing.
DOI: 10.1007/978-3-319-14203-6
- Volgenau, N., Boroson, T., 7 2016. Two years of LCOGT operations: the challenges of a global observatory. In: *Peck, A. B., Seaman, R. L., Benn, C. R. (Eds.), SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, p. 99101C.
DOI: 10.1117/12.2233830
- Wang, F., Deng, H., Guo, L., Ji, K., 7 2010. A Survey on Scientific-Workflow Techniques for E-science in Astronomy. In: *2010 International Forum on Information Technology and Applications. IEEE*, pp. 417–420.
DOI: 10.1109/IFITA.2010.210
- Ye, Q.-Z., 2011. Forecasting Cloud Cover and Atmospheric Seeing for Astronomical Observing: Application and Evaluation of the Global Forecast System. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 123, 113.
- Zimmer, P., McGraw, J., Ackermann, M., 2015. Real-Time Optical Surveillance of LEO/MEO with Small Telescopes. *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, held in Wailea, Maui, Hawaii, September 15-18, 2014, Ed.: S. Ryan, The Maui Economic Development Board*, id.103.