

---

# PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA LOS FIXTURES DE LOS TORNEOS PROFESIONALES DEL BÁSQUET DE LA ARGENTINA EN UN FORMATO NBA

---

GUILLERMO DURÁN<sup>\*</sup>SANTIAGO DURÁN<sup>\*\*</sup>JAVIER MARENCO<sup>\*\*\*</sup>FEDERICO MASCIALINO<sup>\*\*\*\*</sup>PABLO A. REY<sup>\*\*\*\*\*</sup>

## Resumen

Hasta la temporada 2013-2014 la Liga Nacional de Básquet de la Argentina se jugaba solamente durante los fines de semana. A partir de la temporada 2014-2015, y en base a una propuesta presentada por los autores de este trabajo, el torneo adquirió un formato similar al de la NBA, la liga profesional de básquet de los Estados Unidos de América. Los partidos se juegan en cualquier día de la semana y los juegos de visita se programan de manera consecutiva en giras de uno a cuatro partidos solicitadas por cada equipo, con el objetivo de reducir los kilómetros viajados y respetar las preferencias de cada equipo. De esta manera, el problema a resolver consiste en una variación no estudiada aún en la literatura del conocido *Traveling Tournament Problem*. Presentamos en este trabajo los modelos de programación matemática utilizados para armar el fixture en las temporadas 2014-2015 y 2015-2016 de la Liga. La

---

<sup>\*</sup>Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile. Departamento de Matemática e Instituto de Cálculo, FCEyN, Universidad de Buenos Aires y CONICET, Argentina. e-mail: gduran@dm.uba.ar.

<sup>\*\*</sup>Departamento de Matemática, FCEyN, Universidad de Buenos Aires y CONICET, Argentina.

<sup>\*\*\*</sup>Instituto de Ciencias, Universidad Nacional de General Sarmiento y Departamento de Computación, FCEyN, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

<sup>\*\*\*\*</sup>Departamento de Matemática, FCEyN, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

<sup>\*\*\*\*\*</sup>Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile, Chile.

modelación consiste de dos etapas, primero se define la secuencia de los partidos de cada equipo y después un segundo modelo asigna los días en que cada partido se tiene que disputar, considerando en ambas etapas una serie de restricciones solicitadas por los equipos participantes, la televisión y la asociación que aglutina a todos los equipos. Con un esquema similar también se ha programado durante estas mismas dos temporadas la segunda división de la Liga, el Torneo Nacional de Ascenso, que es disputado actualmente por 26 equipos. La implementación de estos modelos significó un ahorro superior al 30 % en el promedio de kilómetros viajados por partido jugado como visita, con el consiguiente beneficio económico y el menor desgaste para los jugadores.

PALABRAS CLAVE: Programación en deportes, Fixture, Básquet, Programación entera

---

## 1. Introducción

---

El básquet es uno de los deportes más populares de la Argentina. La creación de la Liga Nacional en 1985, a propuesta de uno de los más famosos entrenadores del momento, León Najnudel, significó un gran impulso para este deporte en todo el país. La creación de la Liga, junto a la aparición a fines de los 90 de una camada de jugadores notables encabezada por Emanuel “Manu” Ginóbili (estrella aún vigente de los San Antonio Spurs en la NBA de América), convirtió a la Argentina en una potencia mundial de este deporte. La medalla de oro olímpica en Atenas 2004, sumada al subcampeonato del mundo en Indianápolis 2002 y a la medalla de bronce olímpica en Beijing 2008, llevaron al país a la cima del básquet mundial durante la década pasada.

Hoy la Liga Nacional de Básquet (LNB), la primera división del básquet de la Argentina, es altamente profesional y está muy expandida a lo largo y a lo ancho de un país muy extenso. A diferencia del fútbol, que es el principal deporte nacional y tiene su principal desarrollo en las grandes urbes (Buenos Aires y su radio de influencia, Rosario, Santa Fe, Córdoba), el básquet tiene un fuerte impacto regional. Por ejemplo, la final de la temporada 2014-2015 de la Liga fue disputada entre Quimsa de Santiago del Estero (que fue finalmente el campeón) y Gimnasia Indalo de Comodoro Rivadavia, mientras que los dos equipos derrotados en las finales de Conferencia (la instancia previa a la gran final de la Liga) fueron San Martín de Corrientes y Quilmes de Mar del Plata. En la temporada 2015-2016 los finalistas fueron San Lorenzo de Almagro (de Buenos Aires), a la postre campeón, y La Unión de Formosa, mientras que los otros dos finalistas de Conferencias fueron Bahía Básquet (de Bahía Blanca)

y Olímpico de Santiago del Estero. Por otra parte, en la temporada 2016-2017 de la Liga los 20 equipos provendrán de 10 provincias distintas (mientras que en la Primera División del fútbol los 30 equipos participantes son de ocho provincias diferentes, y 26 de ellos provienen de sólo cuatro distritos). Estos ejemplos dan una muestra cabal de la expansión y la federalización del básquet en la Argentina.

Los principales equipos de básquet del país tienen altos presupuestos y son apoyados en muchos casos por los gobiernos provinciales y municipales. Estos presupuestos son incluso comparables con los de algunos equipos de fútbol de Primera División. El impacto mediático del básquet argentino también es muy importante. Los periódicos nacionales cubren diariamente las noticias del básquet, mientras que son televisados semanalmente tres partidos de la Liga y un partido del Torneo Nacional de Ascenso (TNA), la segunda división.

A pesar de la alta profesionalización del deporte, hasta la temporada 2013-2014, tanto la Liga como el TNA eran programados de manera manual, con el consecuente perjuicio para los clubes, producto de una programación deficiente. Las grandes distancias a recorrer a lo largo de la temporada hacían más necesaria la aplicación de técnicas modernas de *sports scheduling*.

En los últimos 20 años diversas aplicaciones de *sports scheduling* a problemas del mundo real en diferentes deportes han sido reportadas en la literatura, incluyendo el fútbol [1, 4, 7, 12, 13, 15], el básquet [10, 18, 20], el hockey sobre hielo [6, 11] y el cricket [19]. Interesantes recopilaciones sobre *sports scheduling* han sido publicadas en los últimos años [9, 14].

Un excelente banco de pruebas para diferentes modelos, algoritmos y herramientas metodológicas en *sports scheduling* es el *Traveling Tournament Problem* (TTP) [5]. Dado un conjunto de  $n$  equipos y las distancias entre los estadios donde hace de local cada uno de ellos, el TTP consiste en armar una programación de un torneo ficticio *double round-robin* (cada equipo juega contra cada otro equipo dos veces, una de local y una de visita), con  $2(n - 1)$  rondas, de modo que ningún equipo juegue menos que  $L$  ni más que  $U$  partidos consecutivos como local ni como visita (típicamente  $L = 1$  y  $U = 3$ ), ningún equipo juegue contra otro en dos rondas consecutivas y se minimice la distancia total viajada. Se considera que ningún equipo retorna a su casa en medio de una secuencia de partidos como visita (y esta secuencia se denomina una *gira*). El TTP es un problema de optimización combinatorial muy difícil de resolver y además su complejidad computacional tampoco está totalmente resuelta. Se sabe que el problema es NP-hard para  $L = 1$  y  $U = 3$  [16] y para  $L = 1$  y  $U = \infty$  [2], pero para otros valores de  $L$  y  $U$  aún es un problema abierto. La primera aplicación del TTP a un problema real fue reportada hace unos años en el vóley argentino [3].

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 presentamos una descripción de los formatos de los torneos, antiguos y actuales, tanto de la Liga como del TNA, y describimos el problema que vamos a resolver. En la Sección 3 mostramos los modelos de programación entera implementados para resolver los diferentes problemas. En la Sección 4 analizamos el impacto del ahorro en viajes gracias al nuevo formato y la aplicación de nuestros modelos. Por último, en la Sección 5 exhibimos las conclusiones y el posible trabajo futuro.

---

## 2. Contexto y descripción del problema

---

La Asociación de Clubes de Básquet de la Argentina (AdC) es la institución que organiza los campeonatos de la LNB y del TNA. Hasta la temporada 2013-2014 la Liga la jugaban 16 equipos, en un formato de parejas. Disputaban primero una fase regional en dos zonas de ocho equipos cada una, jugando todos contra todos, ida y vuelta, y después una fase nacional con los 16 equipos, de nuevo todos contra todos, ida y vuelta. En total cada equipo jugaba 44 partidos a lo largo de la serie regular (fase regional más fase nacional). Para la fase nacional se acumulaba el 50 % de los puntos obtenidos en la fase regional, en una tabla de posiciones que agrupaba a los 16 equipos.

El torneo se organizaba en un formato por parejas y los partidos se disputaban solamente viernes y domingos. Cada fin de semana una pareja de equipos  $A = (A_1, A_2)$  visitaba a otra pareja  $B = (B_1, B_2)$ . Se enfrentaban el viernes  $A_1$  con  $B_2$  y  $A_2$  con  $B_1$ , invirtiendo el domingo los rivales. Había un fin de semana en la fase regional y un fin de semana en la fase nacional destinados exclusivamente a los enfrentamientos entre equipos de la misma pareja. Las parejas se armaban por cercanía geográfica, con la idea de que el equipo visitante viajara poco de un viernes a un domingo, aunque existía una condición extra de que equipos de una misma ciudad no fueran pareja para evitar que se superpusieran siempre los días de sus partidos de local. Al finalizar la serie regular los 12 mejores disputaban el título en un sistema de *play-offs* al mejor de cinco partidos (excepto la final que era al mejor de siete partidos).

No hubo descensos de la Liga al TNA en la temporada 2013-2014. El torneo empezó en octubre de 2013 y finalizó en junio de 2014, con un receso para las fiestas de Navidad y Año Nuevo.

Por otra parte, el TNA en la temporada 2013-2014 lo disputaron 20 equipos. Se jugó también en 2 fases, pero en este caso una zonal y otra regional. La fase zonal eran 4 grupos de 5 equipos cada uno, jugando todos contra todos,

ida y vuelta, a un partido por fin de semana. La fase regional estuvo compuesta por dos grupos (norte y sur) de 10 equipos cada uno, jugando todos contra todos, ida y vuelta, nuevamente a un partido por fin de semana. En total cada equipo jugó 26 partidos a lo largo de la serie regular. Para la fase regional se acumularon el 50 % de los puntos obtenidos en la fase zonal, en dos tablas de posiciones (grupo norte y grupo sur) con 10 equipos cada una. Al finalizar la serie regular los 8 mejores de cada grupo se enfrentaron en un sistema de *play-offs* al mejor de cinco partidos, en búsqueda de los dos ascensos a la Liga. Los décimos de cada grupo descendieron al Torneo Federal, la tercera división del básquet argentino.

El formato en parejas de la Liga Nacional y el de un partido por semana del TNA eran sencillos de programar de manera manual pero mostraban una misma falencia: en un país muy extenso había poco aprovechamiento de los viajes para disputar varios partidos juntos, lo que implicaba mayor número de kilómetros viajados a lo largo de la temporada y mayor desgaste para los jugadores. Por ello, y a propuesta de los autores de este trabajo, a partir de la temporada 2014-2015 se decidió cambiar el sistema de disputa y pasar a un formato similar al de la NBA, por giras, donde se pudieran aprovechar bien los viajes. La NBA, la liga profesional de básquet de los Estados Unidos, es la más importante del mundo. A diferencia de las grandes ligas de Europa, la NBA presenta las mismas características que la liga argentina en cuanto a las grandes distancias de viajes y a la gran cantidad de partidos que se disputan en la serie regular. Hasta nuestro conocimiento, no se ha reportado en la literatura cómo se efectúa la programación de la NBA.

Con este nuevo formato en la liga argentina, por ejemplo, el equipo de Formosa (ciudad situada 1200 km al norte de Buenos Aires) podría viajar a Buenos Aires y jugar tres partidos consecutivos (lunes-miércoles-viernes), antes de volver a su ciudad. Este cambio, además de provocar fuertes ahorros en viajes, implicaba abandonar las parejas y los partidos sólo en fines de semana. Las giras serían propuestas por los equipos, de modo de no exigir necesariamente las que implicaran el menor recorrido global, sino que cada equipo pudiera conjugar ahorros en viajes con decisiones de índole más deportivas. También se propuso para mejorar el atractivo del torneo programar buena parte de los partidos de mayor convocatoria al principio y al final de la serie regular.

Con el ascenso de dos equipos del TNA a la Liga en la temporada 2013-2014 y la ausencia de descensos en la Liga, la LNB pasó a tener 18 equipos en 2014-2015. El sistema de disputa fue por Conferencias (Norte y Sur), de nueve equipos cada una. Se organizaron nuevamente una fase regional y una fase nacional. En la fase regional se enfrentaron todos contra todos ida y vuelta,

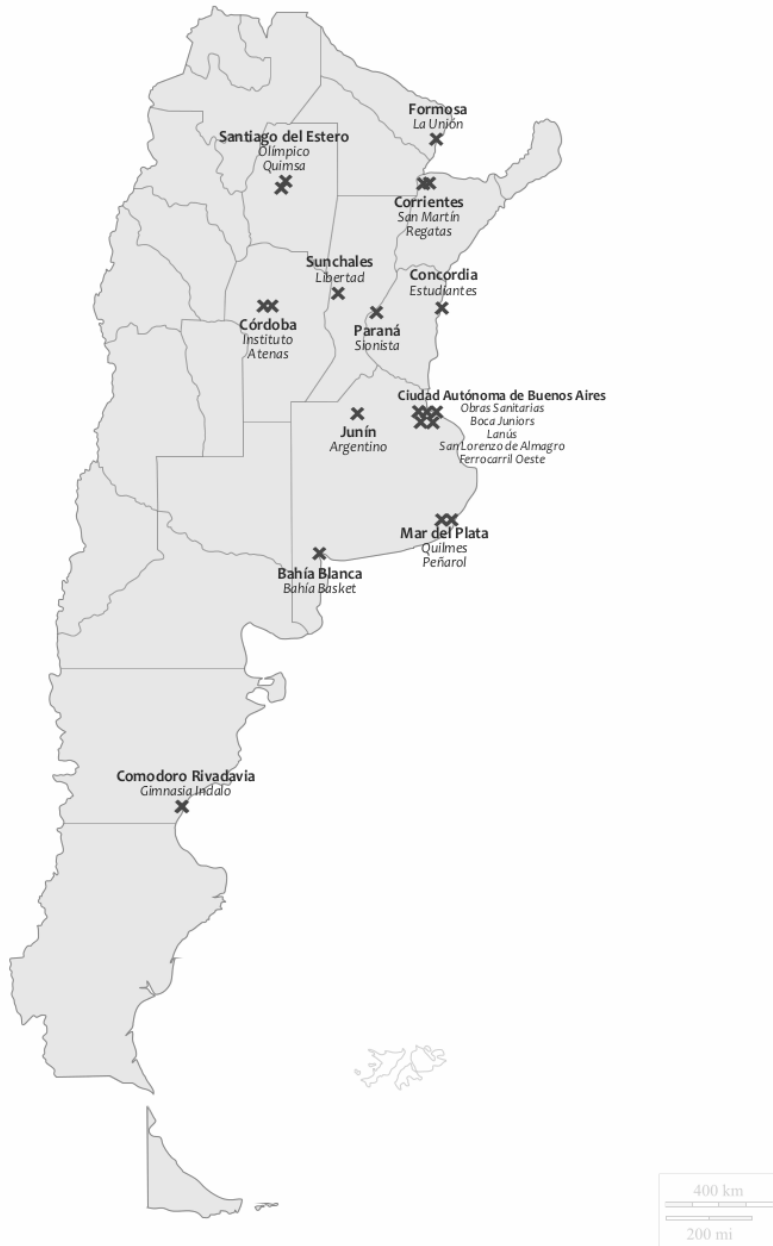
repetiendo dos veces más cada “clásico” (partido entre dos equipos con alta rivalidad). Por ser impar el número de equipos en cada Conferencia hubo un clásico que cruzaba a un equipo del Norte, Atenas de Córdoba, con uno del Sur, Boca Juniors, de la ciudad de Buenos Aires. De este modo cada equipo disputaba en la fase regional 18 partidos. La fase nacional fue un todos contra todos, ida y vuelta, de los 18 equipos, lo que agregaba 34 partidos más por equipo, llegando a 52 en toda la serie regular. Las tablas de posiciones eran por Conferencia y se acumulaban todos los puntos de la fase regional y de la fase nacional. Al finalizar la serie regular los siete primeros de cada Conferencia pasaron a los cuartos de final del *play-off* de su respectiva Conferencia, mientras que el octavo y el noveno disputaron un *play-off* al mejor de tres partidos para determinar el último clasificado a cuartos de final. A partir de allí jugaron en un sistema de *play-offs* al mejor de cinco partidos hasta determinar al campeón de cada Conferencia. Los dos campeones de Conferencias se enfrentaron en la gran final de la Liga Nacional en un *play-off* al mejor de siete partidos. Nuevamente se determinó que no hubiera descensos al TNA.

Para la temporada 2015-2016 los equipos en la Liga pasaron a ser 20. El esquema fue similar al de la temporada anterior: por Conferencias, de 10 equipos cada una, y en dos fases (regional y nacional), ambas de todos contra todos, ida y vuelta. Cada equipo disputó entonces en la serie regular 56 partidos (18 en la fase regional, 38 en la fase nacional). Las tablas de posiciones fueron por Conferencia y se acumularon todos los puntos de la fase regional y de la fase nacional. Al finalizar la serie regular, los dos primeros de cada Conferencia estuvieron clasificados directamente a los *play-off* de semifinales de su respectiva Conferencia, mientras que del tercero al sexto se enfrentaron en *play-offs* de cuartos de final al mejor de cinco partidos. Del séptimo al noveno de cada Conferencia finalizaron su temporada, mientras que los décimos de cada Conferencia se enfrentaron entre sí, en un *play-off* de cinco partidos, para evitar el descenso al TNA (serie en la que Lanús, de Buenos Aires, superó a Sionista de Paraná). Las semifinales y finales de Conferencia se disputaron en *play-offs* a cinco partidos, mientras que los dos campeones de cada Conferencia se enfrentaron en un *play-off* a siete partidos, para determinar al ganador de la Liga Nacional.

En la Figura 1 podemos ver la ubicación en el mapa de la Argentina de los equipos de la Liga Nacional durante la temporada 2015-2016.

El TNA para la temporada 2014-2015 también pasó a un formato con giras. Lo disputaron 24 equipos. La fase zonal fueron seis grupos de cuatro equipos cada uno, jugando a cuádruple vuelta. La fase regional fueron dos Conferencias (Norte y Sur) de 12 equipos cada una, jugando todos contra todos, ida y vuelta, dentro de cada Conferencia. En total cada equipo jugó 34 partidos a lo largo

Figura 1: Equipos participantes de la LNB, temporada 2015-2016.



de la serie regular. Para la fase regional se acumulaba el 50% de los puntos obtenidos en la fase zonal, en dos tablas de posiciones (Conferencia Norte y Conferencia Sur) con 12 equipos cada una. Al finalizar la serie regular los dos ascensos a la Liga se definieron en un sistema de *play-offs* al mejor de cinco partidos por serie. No hubo descensos al Torneo Federal.

La temporada 2015-2016 del TNA fue disputada en un formato similar, por 26 equipos. En este caso hubo 4 zonas en la fase zonal: norte con 7 equipos, centro-norte con 6 equipos, centro-sur con 6 equipos y sur con 7 equipos. Para que en esta fase a doble vuelta todos jugaran 12 partidos se incluyó un interzonal entre equipos de la centro-norte con equipos de la centro-sur (y por ello se programaron estas 2 zonas como una única, que llamamos zona centro). La fase regional fue de nuevo en 2 Conferencias (Norte y Sur), pero ahora de 13 equipos cada una, y los equipos acumularon el 100% de los puntos obtenidos en la fase zonal. Cada equipo disputó en este caso 36 partidos en la serie regular. El único ascenso a la Liga, obtenido por Hispano Americano de Río Gallegos, se definió en un sistema de *play-offs* al mejor de cinco partidos cada serie. Nuevamente no hubo descensos al Torneo Federal.

En la Figura 2 podemos ver la ubicación en el mapa de la Argentina de los equipos del TNA durante la temporada 2015-2016.

Con la implementación del nuevo formato en las dos categorías se decidió colocar semanas completas de descanso a lo largo de la competencia. En el caso de la Liga, una de ellas es en la fase regular y dos más en la fase nacional. En el caso del TNA, es ubicada entre ambas fases. Estas semanas se usan a posteriori para reprogramaciones, producto de suspensiones de partidos ya sea por competencias internacionales cuyas fechas no se conocían al programar el fixture, u otros motivos de fuerza mayor. En general, en caso de suspenderse algún partido en el marco de una gira de visita de algún equipo, se intenta mover toda la gira, para no desperdiciar tiempos de viaje. Las reprogramaciones suelen ser sencillas por lo que se hacen de manera manual.

El objetivo principal de nuestra programación es asignar a cada equipo las giras de visita que sus directivos solicitaron, y esta medida es la que vamos a incorporar en la función objetivo del modelo que asigna la secuencia de partidos de cada equipo. Estas giras son de habitualmente dos o tres partidos consecutivos fuera de casa, antes de volver a la propia. En algún caso puede haber giras de un partido solo (cuando se viaja a un lugar cercano, o a un lugar lejano que no tenga cerca otros posibles rivales), o hasta de cuatro partidos, en algunos casos aislados. Otras restricciones usualmente empleadas tienen que ver con tener en cuenta no disponibilidades de ciertos estadios en ciertas fechas; no tener largas secuencias de partidos consecutivos de local o de visita; considerar la participación de algunos equipos en competencias internaciona-



Figura 2: Equipos participantes del TNA, temporada 2015-2016.



les para evitar superposiciones con sus partidos en el torneo local; tener en cuenta ciertos requerimientos de los canales de televisión que transmiten semanalmente los partidos; ubicar partidos atractivos en momentos estratégicos del torneo.

Dada la dificultad computacional de resolver en un único modelo el orden de los partidos y los días específicos de cada juego, se resolvió atacar el problema en dos etapas: la primera asigna la secuencia de partidos de cada equipo, y la segunda indica el día de cada juego, tomando en cuenta las preferencias de días de local que cada equipo expresa. Los modelos empleados para cada etapa son presentados en la próxima sección.

---

### 3. Enfoque de solución

---

Presentamos en esta sección el enfoque de solución a través de modelos de programación entera empleados para la asignación del orden de los partidos de cada equipo, en una primera etapa, y de asignación de días a cada juego (manteniendo el orden de juegos dado por la resolución de la primera etapa del problema), en una segunda etapa.

Los modelos fueron implementados con el lenguaje de modelado zimpl y resueltos con Cplex 12.5 en un computador con dos procesadores corriendo a 1.5 GHz y con una memoria RAM de 2 GB.

#### 3.1. Modelo para asignación de juegos

La asignación de la secuencia de juegos de cada equipo se realiza por medio de un modelo de programación entera que toma como entrada principal las giras de visita solicitadas. Como en este primer modelo no se tienen en cuenta los días del calendario en los que se juega cada partido, entonces se recurre a una aproximación para programar los partidos a lo largo del calendario. Para esto, se definen tres *fechas* por semana, de modo tal que cada equipo puede jugar hasta tres partidos por semana. Se puede considerar que estas tres fechas corresponden al lunes, miércoles y viernes de la semana en cuestión, y que entonces este primer modelo asigna juegos solamente en estos días. El segundo modelo (a ser descrito en la Sección 3.2) se encargará luego de distribuir los partidos a lo largo de la semana.

Los datos para el primer modelo son los siguientes:

- Conjunto  $E$  de equipos.
- Para cada equipo  $e \in E$ , un conjunto  $G(e)$  de giras posibles. Cada gira

es una secuencia de uno a cuatro equipos distintos de  $e$  y distintos entre sí. Definimos  $G = \cup_{e \in E} G(e)$  como el conjunto de todas las giras.

- Para cada equipo  $e \in E$ , un conjunto  $GP(e) \subseteq G(e)$  de *giras preferidas* para el equipo  $e$ . Estas giras, con su correspondiente orden estricto de partidos, son las seleccionadas por el equipo, y conforman un cubrimiento de todos los partidos de visita de ese equipo. Por su parte, las giras de  $G(e) \setminus GP(e)$  son giras agregadas por los autores para ayudar a la factibilidad del modelo. Se considera que los partidos en una gira se juegan en fechas consecutivas.
- Cantidad  $n$  total de fechas. Definimos además  $F = \{1, \dots, n\}$  como el conjunto de todas las fechas.
- Conjunto  $C$  de *fechas de corte*. Una gira no puede comenzar antes y terminar después de una fecha de corte. Este conjunto (definido por la AdC) está originado por la existencia de semanas de descanso dentro del calendario, y entonces no se debe comenzar una gira si no hay tiempo suficiente antes de una semana de descanso. En el contexto del modelo, esto se traduce en estas fechas de corte, y suponemos que corresponden al viernes inmediatamente anterior a una semana de descanso.

Es importante mencionar que, con estos datos, los equipos no jugarán en todas las fechas dado que al considerar tres fechas por semana, la cantidad de fechas es aproximadamente un 50% superior a la cantidad de partidos que cada equipo debe jugar (se planifica el torneo para que cada equipo dispute en promedio 2 partidos por semana). Por este motivo, el modelo debe contemplar la existencia de una cierta cantidad de *byes* (fechas donde el equipo está libre, o sea, sin partido) para cada equipo. Esta característica, junto con la existencia de giras predefinidas, hace que el problema modelado corresponda a una variación no estudiada en la literatura del TTP. El objetivo será maximizar el número de partidos asignados al fixture que pertenezcan a giras de visita elegidas por los equipos.

Para la formulación del modelo, introducimos una variable binaria  $z_{tk}$  para cada gira  $t \in G$  y cada fecha  $k \in F$  con  $k \leq n - |t| + 1$  (siendo  $|t|$  la cantidad de partidos en la gira  $t$ ), de modo tal que  $z_{tk} = 1$  si y sólo si la gira  $t$  comienza a partir de la fecha  $k$ . Además, introducimos la variable auxiliar  $x_{ijk}$  para cada par de equipos  $i, j \in E$ ,  $i \neq j$  y cada fecha  $k \in F$ , de modo tal que  $x_{ijk} = 1$  si y sólo si el equipo  $i$  juega de local contra el equipo  $j$  en la fecha  $k$ . Aunque estas últimas variables se pueden definir a partir de las variables  $z$  (y, por lo tanto, no son indispensables para el modelo), su introducción permite simplificar la

formulación del modelo. Con estos elementos, podemos plantear el siguiente modelo para el primer problema:

1. La función objetivo busca maximizar la cantidad de partidos seleccionados que provengan de giras preferidas:

$$\text{máx} \sum_{e \in E} \sum_{t \in GP(e)} \sum_{k \in F} |t| z_{tk}.$$

2. Se juegan todos los partidos:

$$\sum_{k \in F} x_{ijk} = 1 \quad \forall i, j \in E, i \neq j. \quad (1)$$

3. Cada equipo juega a lo sumo un partido por fecha:

$$\sum_{j \in E} x_{ijk} + x_{jik} \leq 1 \quad \forall i \in E, \forall k \in F. \quad (2)$$

4. Con la definición, de la variable  $x_{ijk}$  dada más arriba, ésta debe tomar el valor 1 si y sólo si el equipo  $j$  realiza una gira que incluye al equipo  $i$  en la fecha  $k$ . Dado un equipo  $i \in E$  y una gira  $t \in G$  que incluye al equipo  $i$ , definimos  $\text{pos}(t, i) \in \{0, \dots, |t| - 1\}$  como la posición del equipo  $i$  dentro de la secuencia de partidos dada por  $t$ :

$$x_{ijk} = \sum_{t \in G(j)} z_{t, k - \text{pos}(t, i)} \quad \forall i, j \in E, i \neq j, \forall k \in F. \quad (3)$$

5. Se juegan al menos dos partidos de local dentro de las cuatro fechas posteriores a cada gira, para no tener secuencias de partidos de visita muy largas para un equipo dado:

$$\sum_{j \in E} \sum_{s=0}^4 x_{ij, k+|t|+s} \geq 2z_{tk} \quad \forall i \in E, \forall t \in G(i), \quad (4)$$

$$\forall k \in F, k + |t| + 4 \leq n.$$

6. Ninguna gira puede comenzar antes y terminar después de una fecha de corte:

$$z_{tk} = 0 \quad \forall c \in C, \forall t \in G, \forall k \in F, k \leq c < k + |t| - 1. \quad (5)$$

7. Se tiene un *bye* antes o después de cada gira, para favorecer el descanso de los jugadores:

$$\sum_{j \in E} (x_{ij, k+|t|} + x_{ji, k+|t|}) + \sum_{j \in E} (x_{ij, k-1} + x_{ji, k-1}) \leq 2 - z_{tk}$$

$$\forall i \in E, \forall t \in G(i), \forall k \in F, 1 < k \leq n - |t|. \quad (6)$$

8. No se deben tener más de dos *byes* seguidos, para no estar largos tiempos sin jugar:

$$\sum_{j \in E} \sum_{s=0}^2 x_{ij,k+s} + x_{ji,k+s} \geq 1 \quad \forall i \in E, \forall k \in F, k+2 \leq n. \quad (7)$$

9. Se debe tener al menos un partido de visita cada  $\ell$  fechas. Esta restricción está originada en la necesidad de no tener demasiados partidos seguidos de local, para no saturar a los aficionados. Se trabajó habitualmente con  $\ell = 6$ :

$$\sum_{j \in E} \sum_{s=0}^{\ell-1} x_{ji,k+s} \geq 1 \quad \forall i \in E, \forall k \in F, k + \ell - 1 \leq n. \quad (8)$$

10. Naturaleza de las variables:

$$z_{tk} \in \{0, 1\} \quad \forall t \in G, \forall k \in F, \quad (9)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in E, i \neq j, \forall k \in F. \quad (10)$$

Se podría utilizar una función objetivo alternativa que represente la distancia total recorrida por los equipos (multiplicando cada variable  $z_{tk}$  por la distancia total de la gira  $t$ ), y que penalice las distancias de las giras no preferidas (por ejemplo, duplicando la distancia de estas giras). Esta posibilidad fue explorada para las instancias de la temporada 2014-2015, y los resultados fueron muy similares a los obtenidos con la función objetivo presentada aquí. Esto se debe a que las giras propuestas por los equipos ya representan buenos recorridos en términos de las distancias totales. Dado el comportamiento similar de ambos modelos preferimos la versión explicada en este trabajo que nos permite independizarnos de las distancias de viajes.

La estructura del problema hace que el mismo sea muy difícil de resolver para instancias de más de 13 equipos, como muestra la Tabla 1. Esta conclusión es acorde con lo conocido para el TTP donde existen aún instancias abiertas para  $n = 12$  [17].

En la primera parte de la Tabla 1 (primeras 13 filas) se reportan todas las instancias consideradas en la sección anterior (excepto la fase zonal del TNA temporada 2014-2015 que al ser grupos de 4 equipos se resuelven en todos los casos en menos de 1 segundo), mostrando sus respectivos tamaños, la cantidad de variables y restricciones del modelo para estos casos, el tiempo de resolución en segundos y el *gap* de optimalidad final.

Puede verse que el modelo permite resolver adecuadamente las instancias zonales y regionales de ambos campeonatos alcanzando optimalidad en todos

ellos excepto en un caso del TNA donde existe un *gap* de 2,85%. En cambio, no puede resolver las fases nacionales de la Liga, en la que participan todos los equipos durante una cantidad prolongada de fechas. En estos casos, el *solver* no puede encontrar siquiera soluciones factibles luego de varias horas de ejecución, y entonces es necesario recurrir a técnicas alternativas para hallar una solución satisfactoria, como se describe a continuación.

La existencia de semanas de descanso permite dividir el diseño del fixture en *etapas* separadas (aunque no independientes). Claramente no puede haber giras que comiencen antes y terminen después de cada fecha de corte y los partidos programados en una determinada etapa ya no deben considerarse como pendientes para etapas posteriores. Sea  $C = \{f_1, \dots, f_p\}$  el conjunto de fechas de corte, y definimos además  $f_0 = 0$  y  $f_{p+1} = n$ . Las consideraciones anteriores sugieren el siguiente algoritmo heurístico, que se utilizó en este trabajo para las instancias más grandes y permitió obtener soluciones satisfactorias en todos los casos:

1. Dividir el conjunto  $F$  de fechas en subconjuntos  $F_0, \dots, F_p$ , de modo tal que  $F_q = \{f_q + 1, f_q + 2, \dots, f_{q+1}\}$ , para  $q = 0, \dots, p$ . Es decir, las fechas de  $F_q$  son consecutivas y cubren un intervalo entre dos fechas de corte consecutivas, correspondiendo así a la  $(q + 1)$ -ésima etapa del campeonato.
2. Definir  $P := \emptyset$ . Este conjunto representa los partidos ya jugados en las etapas anteriores.
3. Para  $q$  desde 0 hasta  $p$ , realizar los siguientes pasos:
  - a) Resolver el modelo (2)-(10) donde  $F$  tiene ahora  $\lfloor \alpha |F_q| \rfloor$  fechas (siendo  $0 < \alpha < 1$ , el  $\alpha$  lo elegimos de modo de balancear los *byes* de cada equipo a lo largo del torneo), reemplazando la restricción (1) por

$$\sum_{k \in F} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall i, j \in E, i \neq j,$$

(es decir, ahora no se deben jugar todos los partidos), eliminando las giras que incluyen partidos de  $P$ , y reemplazando la función objetivo por la siguiente expresión:

$$\text{máx} \sum_{e \in E} \left[ \sum_{t \in GP(e)} \sum_{k \in F} 2|t|z_{tk} + \sum_{t \in G(e) \setminus GP(e)} \sum_{k \in F} |t|z_{tk} \right].$$

Es decir, se busca maximizar la cantidad de partidos seleccionados para el intervalo de fechas, contando “doble” a los partidos que participan en las giras seleccionadas por los equipos.

- b) Agregar a  $P$  los partidos jugados en la solución del paso anterior.
4. Combinar los fixtures generados para cada etapa y retornar la solución obtenida.

Este procedimiento busca diseñar el fixture por etapas, tomando las fechas de corte como divisiones de cada una de ellas. El modelo que se resuelve para cada etapa (paso 3a en el algoritmo) busca maximizar el número de partidos incluidos en la misma, con el objetivo de facilitar la tarea de las etapas siguientes. Para  $q = 0, \dots, p$ , en la etapa  $q$  no se consideran las  $|F_q|$  fechas de la etapa, sino que se resuelve el modelo con  $\lfloor \alpha |F_q| \rfloor$  fechas, siendo  $0 < \alpha < 1$  un parámetro del algoritmo (nos ha dado buenos resultados fijar ese  $\alpha$  en 0,8 o 0,9). Esta modificación permite que la maximización de la cantidad de partidos en la etapa no genere demasiados partidos en las primeras etapas, y en consecuencia demasiados *byes* en las últimas etapas.

El resultado final de este algoritmo puede no incluir a todos los partidos, y en ese caso se podría iterar el procedimiento repitiendo los pasos de las etapas anteriores con restricciones adicionales que soliciten una solución distinta a las obtenidas en iteraciones anteriores para esa etapa. Esto genera un algoritmo de tipo *backtracking* hasta que el fixture completo contenga todos los partidos. Para las instancias consideradas en este trabajo, el resultado final contuvo a todos los partidos y entonces no fue necesario recurrir a esta técnica.

Las últimas seis filas de la Tabla 1 muestran el comportamiento del modelo resuelto en el paso 3a del algoritmo sobre los dos campeonatos de la Liga Nacional considerados en este trabajo. Se alcanzó optimalidad dentro del tiempo límite de una hora seleccionado en todos los casos excepto en una de las fases nacionales de la Liga. Los fixtures obtenidos resultaron altamente satisfactorios en todos los casos. Más del 90 % de los partidos de visita programados en los fixtures finales de todas las instancias resueltas corresponden a partidos de visita pertenecientes a giras preferidas por los equipos.

### 3.2. Modelo para asignación de días

Una vez obtenida una solución mediante el modelo de la sección anterior, resta asignar los días del calendario en que se llevará a cabo cada uno de los juegos. Para ello se utiliza el modelo que formulamos en esta subsección. Hasta nuestro conocimiento no hay en la literatura de *sports scheduling* utilización de modelos matemáticos para asignar los días de los partidos en una competencia deportiva.

Instancia	$ E $	$ G $	$ F $	Vars.	Restr.	Tiempo	Gap
2014/2015 TNA Sur	12	125	36	9684	10535	298,30	0,00 %
2014/2015 TNA Norte	12	131	36	9900	10732	298,74	0,00 %
2014/2015 LNB Sur	9	*312	21	7617	5586	61,99	0,00 %
2014/2015 LNB Norte	9	*312	21	6457	4493	15,44	0,00 %
2014/2015 LNB	18	630	56	43884	32706	—	—
2015/2016 TNA Sur	7	*248	17	4981	2056	59,48	0,00 %
2015/2016 TNA Centro	12	*248	17	6630	4857	27,06	0,00 %
2015/2016 TNA Norte	7	*248	17	5015	2737	208,54	0,00 %
2015/2016 TNA Reg. Sur	13	160	40	13160	14372	3600	2,85 %
2015/2016 TNA Reg. Norte	13	270	40	17560	23622	52,69	0,00 %
2015/2016 LNB Sur	10	*1543	24	39342	8486	9,43	0,00 %
2015/2016 LNB Norte	10	*1543	24	35904	8486	480,20	0,00 %
2015/2016 LNB	20	1543	53	102979	36404	—	—
2014/2015 LNB 1/3	18	*630	14	13258	28299	24,45	0,00 %
2014/2015 LNB 2/3	18	*630	16	15264	24889	320,74	0,00 %
2014/2015 LNB 3/3	18	*630	19	18126	31317	1072,07	0,00 %
2015/2016 LNB 1/3	20	*1543	23	44689	21505	1767,01	0,00 %
2015/2016 LNB 2/3	20	*1543	12	23304	9733	3600	5,98 %
2015/2016 LNB 3/3	20	*1543	12	23304	8652	3349,63	0,00 %

Tabla 1: Características y tiempos de resolución del primer modelo para las instancias consideradas. Los tiempos están expresados en segundos, y para las instancias marcadas con “—” no se pudo encontrar solución factible luego de una hora de ejecución. Las cantidades de giras marcadas con asteriscos corresponden al total de las giras para todos los equipos, no sólo a las giras para la zona en consideración.

Este segundo modelo recibe como entrada el orden de los juegos de cada equipo a lo largo del torneo, los días designados para el desarrollo del mismo y una lista de preferencias para cada equipo con días del calendario en que prefieren jugar de local.

Quedan entonces determinados los siguientes conjuntos:

- Conjunto  $E$  descrito en la sección anterior.
- Conjunto  $D = \{1, \dots, m\}$ , los días calendario tomados de corrido a partir de un día 1 fijado previamente.
- Cantidad  $l$  total de partidos que juega cada equipo, tomando el máximo en caso de que no coincida la cantidad de partidos que juegan los distintos equipos. Notar que si bien en un torneo completo la cantidad de partidos



que juega cada equipo es la misma, hay casos en los que se hace necesario considerar que esto no sucede, como explicaremos más adelante.

- Conjunto  $J = \{1, \dots, l\}$  de índices de la secuencia de los juegos a ser disputados por cada equipo, de acuerdo al orden determinado por el modelo anterior.

La aplicación del modelo se hará para los torneos completos cuando el modelo inicial haya resuelto todo el torneo junto, o para cada bloque, cuando así lo haya hecho el primer modelo. Claramente la solución de un bloque no afecta a la solución de los demás.

Para aplicar el modelo en un determinado bloque, cuando no se exige que la cantidad de partidos jugados por cada equipo sea la misma, se consideran partidos ficticios para trabajar con un único valor  $l$ .

Se introduce la variable binaria  $x_{ipt}$  para cada equipo  $i \in E$ , cada juego  $p \in J$  y cada día  $t \in D$ , la cual cumple que  $x_{ipt} = 1$  si y sólo si el equipo  $i$  juega su juego  $p$  el día  $t$ . Introducimos además las variables binarias auxiliares  $da_{ipt}$  y  $db_{ipt}$ . Estas variables son necesarias debido a que no siempre es posible cumplir con las restricciones pedidas por la AdC de tener dos días de descanso antes y después de cada gira. De este modo,  $db_{ipt} = 1$  si y sólo si el equipo  $i$  tiene un solo día de descanso antes de  $t$ , día en el que juega su primer partido de gira  $p$ ; análogamente queda definida la variable  $da_{ipt}$ , para el caso de un solo día de descanso posterior a la gira  $p$ . En la función objetivo hay una penalización cada vez que alguna de estas variables vale 1.

Teniendo en cuenta las preferencias de días de cada equipo, se define un parámetro  $pref(i, t)$  para cada equipo  $i \in E$  y para cada día  $t \in D$ , que vale 1 si el equipo  $i$  prefiere jugar de local el día  $t$  y 0, en caso contrario. Por último, se introduce un parámetro  $gira(i, p)$  para cada equipo  $i \in E$  y cada juego  $p \in J$ , que cumple que  $gira(i, p) = 1$  si y sólo si el equipo  $i$  juega su juego  $p$  en una gira y 0, en caso contrario.

De esta manera, formulamos el modelo para esta segunda etapa:

1. La función objetivo busca maximizar la cantidad de juegos desarrollados en días preferidos por el equipo local, penalizando además la cantidad de veces que los equipos empiezan o terminan giras sin la cantidad de días de descanso pedidos. El valor 1000 para el coeficiente de penalización fue definido de manera de lograr el efecto deseado sin provocar problemas numéricos en la resolución computacional del modelo.

$$\max \sum_{i \in E, p \in J, t \in D} x_{ipt} \cdot pref(i, t) - 1000 \cdot \sum_{i \in E, p \in J, t \in D} (db_{ipt} + da_{ipt}).$$

2. No se invierte el orden de los partidos:

$$\begin{aligned} x_{ipt} + x_{iqs} &\leq 1 && \forall i \in E, \forall p, q \in J, \\ &&& \forall s, t \in D, p < q, s \leq t. \end{aligned} \quad (11)$$

3. Se juegan todos los partidos:

$$\sum_{t \in D} x_{ipt} = 1 \quad \forall i \in E, \forall p \in J. \quad (12)$$

4. Ningún equipo juega dos partidos en días consecutivos:

$$\begin{aligned} x_{ipt} + x_{i,p+1,t+1} &\leq 1 && \forall i \in E, \forall p \in J, p < |J| \\ &&& \forall t \in D, t < |D|. \end{aligned} \quad (13)$$

5. Se estipula un día de descanso entre dos partidos consecutivos de una misma gira:

$$\begin{aligned} x_{ipt} &= x_{i,p+1,t+2} && \forall i \in E, \forall p \in J, p < |J| \\ &&& \forall t \in D, t < |D| - 1, \end{aligned} \quad (14)$$

con  $p$  y  $p + 1$  dos partidos de la misma gira.

6. Se intenta dejar al menos dos días de descanso antes y después de cada gira:

a) si  $p$  es el primer partido de la gira,

$$\begin{aligned} x_{i,p-1,t-2} + x_{ipt} &\leq 1 + db_{ipt} && \forall i \in E, \forall p \in J, p > 1 \\ &&& \forall t \in D, t > 2. \end{aligned} \quad (15)$$

b) si  $p$  es el último partido de la gira:

$$\begin{aligned} x_{ipt} + x_{i,p+1,t+2} &\leq 1 + da_{ipt} && \forall i \in E, \forall p \in J, p < |J| \\ &&& \forall t \in D, t < |D| - 1. \end{aligned} \quad (16)$$

7. Se asigna el mismo día a ambos equipos para los partidos en que se enfrentan entre ellos:

$$x_{ipt} = x_{jqt} \quad \forall i, j \in E, \forall t \in D$$

si el partido  $p$  para  $i$  y el partido  $q$  para  $j$  corresponden al partido en que se enfrentan  $i$  y  $j$ .

## 8. Naturaleza de las variables:

$$x_{ipt} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in E, \forall p \in J, \forall t \in D. \quad (17)$$

$$da_{ipt} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in E, \forall p \in J, \forall t \in D \quad (18)$$

$$db_{ipt} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in E, \forall p \in J, \forall t \in D. \quad (19)$$

A diferencia de lo ocurrido con el modelo de la sección anterior, en este caso la estructura del problema no le impide al *solver* encontrar una solución óptima en pocos segundos para todas las instancias consideradas. Por ejemplo, para la Fase Regional del TNA Norte en la temporada 2015-2016, uno de los casos más grandes resueltos, el modelo tiene 21168 variables y 161284 restricciones, demanda un tiempo de resolución de 6,32 segundos y encuentra una solución óptima. Cabe aclarar que en este caso la variable  $da_{ipt}$  toma el valor 1 en dos ocasiones y la variable  $db_{ipt}$  lo hace en una, esto nos muestra que no existe una solución factible que respete en todos los casos los días de descanso pedidos antes y después de cada gira.

---

## 4. Impacto

---

Los modelos aquí presentados fueron utilizados para armar las programaciones de las temporadas 2014-2015 y 2015-2016, tanto de la Liga Nacional, como del TNA, en sus fases regionales y nacionales. Mostramos a continuación un análisis de los kilómetros viajados por los diferentes equipos con el formato actual (y nuestra programación), y con el formato anterior de parejas de los torneos. Veremos que aunque la función objetivo del modelo inicial no minimiza los kilómetros viajados sino que maximiza los partidos de visita seleccionados en la programación provenientes de giras preferidas, por la forma en que estas giras fueron diseñadas se consigue una fuerte disminución en los kilómetros recorridos por cada equipo.

La Tabla 2 compara para el caso de la Liga Nacional las temporadas 2013-2014 (la última disputada con el formato anterior y programación manual), con la 2014-2015 y la 2015-2016, ambas programadas por nosotros y con el sistema de giras. Como puede observarse, en la temporada 2014-2015 la totalidad de los 16 equipos que participaron en ambas temporadas viajó menos kilómetros que en la temporada 2013-2014, a pesar de que todos disputaron 4 partidos más de visita. El número de kilómetros recorridos de manera global por todos los equipos es un 8 % menor (353.365 contra 385.810), a pesar de que en la temporada 2014-2015 no sólo se juegan más partidos de visita sino que

también hay 2 equipos más. Si calculamos el promedio de kilómetros viajados por equipo, por cada partido de visita, dicho valor en la temporada 2014-2015 es un 31 % más bajo que en la 2013-2014 (755 km contra 1096 km).

En lo que se refiere a la comparación con la temporada 2015-2016, los resultados son similares. 13 de los 15 equipos que se repiten en esta última temporada y en la 2013-2014, viajan menos en la 2015-2016, a pesar de que tienen 6 partidos más de visita cada uno (en sólo 2 casos, Argentino y Libertad, se invierte este resultado, pero con valores que dan un virtual empate entre ambas temporadas). En lo que hace al promedio de kilómetros viajados por equipo por cada partido de visita, dicho valor en la temporada 2015-2016 es casi un 30 % más bajo que en la 2013-2014 (772 km contra 1096 km).

Equipo	Temporada 2013-2014			Temporada 2014-2015			Temporada 2015-2016		
	km Viajados	Partidos	Promedio	km Viajados	Partidos	Promedio	km Viajados	Partidos	Promedio
Argentino	18561	22	843,68	15255	26	586,73	20014	28	714,79
Ciclista	-	-	-	16826	26	647,15	-	-	-
Quilmes	23546	22	1070,27	19335	26	743,65	22764	28	813,00
Peñarol	25455	22	1157,05	19485	26	749,42	22764	28	813,00
Bahía Basket	28347	22	1288,50	17426	26	670,23	20372	28	727,57
Gimnasia Indalo	47684	22	2167,45	37218	26	1431,46	43215	28	1543,39
Boca Juniors	20278	22	921,73	15632	26	601,23	18332	28	654,71
Obras Sanitarias	20278	22	921,73	17360	26	667,69	18332	28	654,71
Lanús	20278	22	921,73	18814	26	723,62	18814	28	671,93
La Unión	27069	22	1230,41	22013	26	846,65	26362	28	941,50
Regatas	24362	22	1107,36	20121	26	773,88	21626	28	772,36
San Martín	-	-	-	20484	26	787,85	22752	28	812,57
Quimsa	24380	22	1108,18	19367	26	744,88	20722	28	740,07
Olimpico	24305	22	1104,77	19649	26	755,73	21397	28	764,18
Atenas	22087	22	1003,95	22008	26	846,46	21790	28	778,21
Libertad	18401	22	836,41	18127	26	697,19	18685	28	667,32
Sionista	19648	22	893,09	15419	26	593,04	17967	28	641,68
Estudiantes	21131	22	960,50	18826	26	724,08	18818	28	672,07
Instituto	-	-	-	-	-	-	20390	28	728,21
Ferro	-	-	-	-	-	-	18992	28	678,29
San Lorenzo	-	-	-	-	-	-	18332	28	654,71
Total	385810		1096,05	353365		755,05	432440		772,21

Tabla 2: Comparación de kilómetros viajados por los equipos de la LNB durante las temporadas 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016.

En la Tabla 3 mostramos una comparación entre lo viajado en la temporada 2015-2016 en la Liga, programada con nuestros modelos, contra lo que se hubiera viajado de haberse aplicado en esta última temporada el anterior formato de parejas (con parejas armadas con el mismo criterio con el que se armaban antes). Allí se puede apreciar una reducción del 22 % a favor del nuevo sistema (772 km contra 991 km), en el promedio de viaje por equipo, por partido de visita.

En lo que hace al TNA, hacemos las comparaciones de lo viajado en la realidad en las temporadas 2014-2015 y 2015-2016 contra lo que hubieran viajado de haberse disputado los torneos con el formato antiguo que tenía este campeonato, de un partido por semana y sin giras de visita. Notar que no

Equipo	Temporada 2015-2016					
	Formato Parejas			Formato Usado (con giras)		
	km Viajados	Cantidad de Partidos	Promedio	km Viajados	Cantidad de Partidos	Promedio
Argentino	24613	28	879,04	20014	28	714,79
Quilmes	29026	28	1036,64	22764	28	813,00
Peñarol	29026	28	1036,64	22764	28	813,00
Bahía Basket	31451	28	1123,25	20372	28	727,57
Gimnasia Indalo	59947	28	2140,96	43215	28	1543,39
Boca Juniors	22622	28	807,93	18332	28	654,71
Obras Sanitarias	22622	28	807,93	18332	28	654,71
Lanús	22622	28	807,93	18814	28	671,93
La Unión	33447	28	1194,54	26362	28	941,50
Regatas	24362	28	870,07	21626	28	772,36
San Martín	28293	28	1010,46	22752	28	812,57
Quimsa	29129	28	1040,32	20722	28	740,07
Olimpico	29129	28	1040,32	21397	28	764,18
Atenas	25807	28	921,68	21790	28	778,21
Libertad	23170	28	827,50	18685	28	667,32
Sionista	23365	28	834,46	17967	28	641,68
Estudiantes	25247	28	901,68	18818	28	672,07
Instituto	25807	28	921,68	20390	28	728,21
Ferro	22622	28	807,93	18992	28	678,29
San Lorenzo	22622	28	807,93	18332	28	654,71
Total	554929		990,94	432440		772,21

Tabla 3: Comparación entre los kilómetros viajados en el formato de giras utilizado y el formato de parejas alternativo, para la temporada 2015-2016.

comparamos con la última temporada disputada con el formato anterior (la 2013-2014) debido a que la composición de los equipos participantes varió mucho (hubo varios equipos que se retiraron y fueron reemplazados por equipos nuevos), por lo que la comparación no tendría sentido.

En la Tabla 4 hacemos la comparación para la temporada 2014-2015. Para el formato anterior vemos que hay 3 partidos menos de visita por equipo dado que en el esquema previo ambas fases eran a doble vuelta (y en el caso real la fase zonal fue a cuádruple vuelta). Como puede apreciarse hay una reducción global de los kilómetros viajados por todos los equipos de casi un 30 % a favor del nuevo formato, mientras que en el caso del promedio por partido de visita la reducción supera el 42 %.

En la Tabla 5 hacemos la comparación para la temporada 2015-2016. Vemos una reducción de los kilómetros totales viajados y del promedio de kilómetros viajados por partido de visita superior a un 38 %, siempre a favor del nuevo sistema.

El caso más significativo de ahorro de viajes en el TNA es el de Hispano Americano de Río Gallegos, equipo con sede en una de las ciudades más australes del país y del mundo. Este equipo, por ejemplo, debe viajar más de 2500 km para enfrentar a Platense en la ciudad de Buenos Aires. Como puede apreciarse en las Tablas 3 y 4, Hispano Americano redujo sus viajes en un 48 % en la temporada 2014-2015 y un 53 % en la temporada 2015-2016, en ambos

Equipo	Temporada 2014-2015					
	Formato anterior (sin giras)			Formato usado (con giras)		
	km Viajados	Cantidad de partidos	Promedio	km Viajados	Cantidad de partidos	Promedio
9 de Julio	20522	14	1465,86	13711	17	806,53
Anzorena	26840	14	1917,14	20159	17	1185,82
Alianza San Luis	20804	14	1486,00	16180	17	951,76
Banda Norte	18306	14	1307,57	14029	17	825,24
Deportivo Viedma	25880	14	1848,57	18470	17	1086,47
Estudiantes de Olavarría	19974	14	1426,71	13705	17	806,18
Ferro	20264	14	1447,43	20449	17	1202,88
Hispano Americano	58918	14	4208,43	36915	17	2171,47
Huracán de Trelew	31006	14	2214,71	21385	17	1257,94
Monte Hermoso	25342	14	1810,14	17756	17	1044,47
San Lorenzo	20264	14	1447,43	15400	17	905,88
Sport Club Cañadense	21364	14	1526,00	15712	17	924,24
<hr/>						
Norte	km Viajados	Cantidad de Partidos	Promedio	km Viajados	Cantidad de Partidos	Promedio
Tomás de Rocamora	13308	14	950,57	8083	17	475,47
Atlético Echague	9748	14	696,29	7099	17	417,59
Instituto de Córdoba	13186	14	941,86	9092	17	534,82
Barrio Parque	13186	14	941,86	9092	17	534,82
La Unión de Colón	13466	14	961,86	8690	17	511,18
Oberá TC	22160	14	1582,86	12797	17	752,76
Club Atlético San Isidro	9944	14	710,29	7163	17	526,12
UNCAus	14736	14	1052,57	8831	17	519,47
Unión de Santa Fe	9740	14	695,71	6586	17	387,41
Villa Ángela Basket	14562	14	1040,14	8877	17	522,18
Sarmiento	14534	14	1038,14	9905	17	582,65
Tiro Federal Morteros	10846	14	774,71	8944	17	421,35
Total (ambas Conferencias)	468900		1395,54	329030		860,45

Tabla 4: Comparación entre los kilómetros viajados por los equipos del TNA en la temporada 2014-2015 según el formato anterior y el actual.

casos en el promedio de kilómetros recorridos por partido jugado de visita. Cabe destacar que este equipo se consagró campeón del TNA en esta última temporada por lo que jugará la Liga Nacional en la temporada 2016-2017.

Como puede apreciarse los ahorros son aún más significativos para el TNA, debido a que el formato de un partido por semana era más perjudicial con respecto a ahorro de viajes que el formato de parejas que utilizaba la Liga.

Si convertimos los ahorros de kilómetros a platas ahorradas, considerando un costo estimado de 2 dólares por kilómetro viajado (que es el costo de viaje en bus), el ahorro global para la Liga Nacional en la temporada 2015-2016 es de alrededor de US\$ 245.000 (122.489 km, ver Tabla 3), mientras que el ahorro global para el TNA en la misma temporada es de más de US\$ 486.000 (243.340 km, ver Tabla 5). Esto da un ahorro para toda la temporada de ambas divisiones sumadas de una cifra cercana a los US\$ 731.000. Esta cifra es un piso para los ahorros obtenidos dado que estamos tomando el costo de los viajes en bus como base para la estimación y hay varios viajes que los equipos hacen en avión, que es un medio de transporte más caro.

Equipo	Temporada 2015-2016					
	Formato anterior (sin giras)			Formato Usado (con giras)		
Sur	km Viajados	Cantidad de Partidos	Promedio	km Viajados	Cantidad de Partidos	Promedio
Deportivo Viedina	24956	18	1386,44	17255	18	958,61
Estudiantes de Olavarría	22202	18	1233,44	13163	18	731,28
Hispano Americano	71598	18	3977,67	33198	18	1844,33
Huracán de Trelew	34382	18	1910,11	21751	18	1208,39
Monte Hermoso	25484	18	1415,78	15241	18	846,72
Ciclista	22896	18	1272,00	13776	18	765,33
Gimnasia de La Plata	23722	18	1317,89	16804	18	933,56
Platense	22770	18	1265,00	15576	18	865,33
Atenas de Carmen de Patagones	24956	18	1386,44	16722	18	929,00
Tomás de Rocamora	26670	18	1481,67	15516	18	862,00
Parque Sur	27888	18	1549,33	17235	18	957,50
Olimpo	23416	18	1300,89	15880	18	882,22
Petrolero	37048	18	2058,22	21432	18	1190,67
<hr/>						
Norte	km Viajados	Cantidad de Partidos	Promedio	km Viajados	Cantidad de Partidos	Promedio
Atlético Echagüe	14628	18	812,67	11097	18	616,50
Barrio Parque	21118	18	1173,22	12924	18	718,00
La Unión de Colón	20240	18	1124,44	12624	18	701,33
Oberá TC	26950	18	1497,22	15341	18	852,28
Club Atlético San Isidro	15236	18	846,44	11735	18	651,94
Unión de Santa Fe	14942	18	830,11	10414	18	578,56
Villa Ángela Basket	17624	18	979,11	12515	18	695,28
Sarmiento	15664	18	870,22	11683	18	649,06
Tiro Federal Morteros	16696	18	927,56	12071	18	670,61
Comunicaciones	18966	18	1053,67	12442	18	691,22
Hindú	15664	18	870,22	10100	18	561,11
Salta Basket	34616	18	1923,11	16923	18	940,17
UNCAus	16532	18	918,44	10106	18	561,44
Total (ambas Conferencias)	636864		1360,82	393524		840,86

Tabla 5: Comparación entre los kilómetros viajados por los equipos del TNA en la temporada 2015-2016 según el formato anterior y el actual.

Como se desprende del análisis realizado la principal causa de los ahorros es el haber pasado a un formato de torneos con giras, al estilo de lo que se hace en la NBA. Claramente, este nuevo sistema no podría haberse implementado sin la ayuda para su programación de las herramientas matemático-computacionales aquí presentadas (mientras que los formatos utilizados anteriormente se programaban fácilmente de manera manual).

---

## 5. Conclusiones y trabajo futuro

---

Presentamos en este trabajo los modelos de programación matemática utilizados para armar el fixture en las últimas 2 temporadas de la Liga Nacional y el Torneo Nacional de Ascenso, Primera y Segunda División del básquet profesional de la Argentina. La modelación consiste en ambos casos de 2 etapas, el primer modelo permite armar el orden de los partidos de cada equipo, para lo cual se resuelve una nueva variación del TTP, mientras que el segundo modelo asigna los días en que cada partido se tiene que disputar, considerando en ambos modelos una serie de restricciones solicitadas por los equipos

participantes, la televisión y la AdC. Se priorizaron dentro de las condiciones establecidas las cuestiones que tienen que ver con ahorros en viajes, así como también el mejorar el atractivo de los torneos para el público, a través de la ubicación de los partidos más importantes en fechas estratégicas dentro de la programación y de ciertos retoques en el sistema de disputa que llevaron a que hasta último momento los equipos participantes tuvieran algo importante en disputa.

Hasta nuestro conocimiento es la primera vez que se reporta en la literatura de *sports scheduling* la programación de un campeonato con un formato similar al de la NBA.

La implementación de estos modelos significó ahorros superiores al 30 % en el promedio de kilómetros viajados por partido jugado como visita, con el consiguiente beneficio económico (superior a los 700.000 US\$ por temporada) y el menor desgaste para los jugadores. Hay casos donde los ahorros fueron muy superiores al promedio, debido a la situación geográfica del equipo en cuestión y a la decisión dirigenal de aprovechar al máximo el sistema de giras. Uno de tales casos es el de Hispano Americano mencionado en la sección anterior. Otro es el de Bahía B́asquet, en la Liga Nacional, que muestra un ahorro superior al 40 % en el promedio de kilómetros viajados por partido jugado como visita en ambas temporadas. Su presidente, Juan Ignacio “Pepe” Sánchez, medalla de oro olímpica con la selección argentina en Atenas 2004, opinó lo siguiente: “Gracias al sistema desarrollado por el grupo de Investigación de Operaciones nuestro equipo ha llevado sus costos y tiempos de viaje a poco más de la mitad, lo que ha permitido mayor tiempo de descanso y entrenamiento, y una disminución en las lesiones con respecto a otras temporadas” [8].

Una decisión que han tomado varios equipos es reinvertir estos ahorros en reemplazar viajes en bus por viajes en avión para largas distancias (hasta la temporada 2013-2014 muchos de estos viajes, que a veces superaban los 1000 km, se realizaban en bus), lo que ha implicado una fuerte mejora en la calidad de viaje de los jugadores.

Algunos sectores habían expresado que el nuevo sistema podía tener como consecuencia una menor cantidad de victorias de visita por efecto de giras más largas, y menor afluencia de público por no tener días fijos para los partidos y por la “irregularidad” del fixture. Sobre el primer punto, los resultados de las series regulares no confirman esa predicción, el porcentaje de victorias de visita se ha mantenido prácticamente constante. En la última temporada con el sistema anterior hubo 32 % de victorias de visita, cifra que pasó a 33 % en la 2014-2015 y a 31 % en la 2015-2016. Con respecto a la concurrencia de público a los estadios, no contamos con cifras oficiales, pero la percepción de los dirigentes de la AdC es que la asistencia también se ha mantenido en



valores similares a los que había en el pasado.

El nuevo sistema ha tenido una aceptación mayoritaria en la comunidad del básquet argentino aunque también ha recibido algunas críticas de sectores más aferrados al sistema tradicional de parejas y partidos solamente los fines de semana, que se había mantenido en los últimos 30 años de la Liga. En ese sentido, cobran interés las declaraciones a medios periodísticos del entrenador de la selección nacional argentina y de Peñarol de Mar del Plata, Sergio Hernández, antes de la disputa de la última fecha de la serie regular de la temporada 2015-2016: “Aún los que somos críticos del nuevo formato debemos reconocer que el atractivo del torneo ha sido increíble. En esta última fecha en todos los partidos se juega por algo importante”.

Quien también expresó su opinión muy positiva sobre el nuevo formato de la Liga y el uso de técnicas matemáticas para su programación, es el mayor referente de la historia del básquet argentino, Emanuel “Manu” Ginóbili, estrella del básquet mundial y también campeón olímpico con Argentina en 2004: “Considerando el gran tamaño del país y la falta de rutas y vuelos interconectando las ciudades, algo había que hacer con el sistema del campeonato. Los matemáticos de la UBA hicieron un gran trabajo optimizando el tiempo de viaje de los equipos, lo que ha permitido un importante ahorro de dinero para toda la Liga. Seguramente hay ajustes para hacer, pero estoy muy entusiasmado con el cambio implementado” [8].

La conformidad de los directivos de la AdC con este proyecto ha llevado a extender el vínculo con el equipo académico para las próximas temporadas y también a explorar nuevos campos de colaboración. Actualmente estamos empezando a trabajar en un modelo que permita asignar los árbitros a los partidos de la Liga. El proceso se hace hoy de manera manual y existe el convencimiento que de aplicarse también en este caso técnicas modernas de Investigación de Operaciones, la asignación podría hacerse mucho más eficientemente.

***Agradecimientos:*** A la directiva y los clubes de la AdC por su compromiso con la implementación de este proyecto, especialmente a Fabián Borro, su presidente, y a Sergio Guerrero, su Secretario Técnico, quien apoya nuestro trabajo día a día. A “Pato” De Benedetti y todo el departamento de Competiciones de la AdC, por su invaluable ayuda en el proceso de preparación del fixture. A Carlos y Ricardo Prunes, por haber confiado en este grupo de académicos y habernos recomendado a la AdC. A los periodistas Matías Traversa, Fabián Pérez, Fabián García, Alejandro Sonich y Ricardo Sbrana por su colaboración en distintas etapas de este proyecto. A Mario Guajardo, Jaime Miranda, Richard Weber y Andrés Weintraub por sus múltiples sugerencias que mejoraron

la versión final de este trabajo. El primer autor está parcialmente financiado por el Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería, ISCI, Chile (ICM-FIC: P05-004-F, CONICYT: FB0816) y los subsidios UBACyT 20020130100808BA (Argentina), ANPCyT PICT 2012-1324 (Argentina) y FONDECyT 1140787 (Chile).

## Referencias

- [1] T. Bartsch, A. Drexler, y S. Kröger. Scheduling the professional soccer leagues of Austria and Germany. *Computers and Operations Research*, 33(7):1907–1937, 2006.
- [2] R. Bhattacharyya. A note on complexity of traveling tournament problem. *Optimization Online*, 2480, 2009. Consultado en junio 6, 2016, [http://www.optimization-online.org/DB\\_FILE/2009/12/2480.pdf](http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2009/12/2480.pdf).
- [3] F. Bonomo, A. Cardemil, G. Durán, J. Marengo, y D. Sabán. An application of the traveling tournament problem: The Argentine volleyball league. *Interfaces*, 42(3):245–259, 2012.
- [4] G. Durán, M. Guajardo, J. Miranda, D. Sauré, S. Souyris, A. Weintraub, y R. Wolf. Scheduling the Chilean soccer league by integer programming. *Interfaces*, 37(6):539–552, 2007.
- [5] K. Easton, G. Nemhauser, y M. Trick. The traveling tournament problem description and benchmarks. In *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, páginas 580–584. Springer, 2001.
- [6] C. Fleurent y J.A. Ferland. Allocating games for the NHL using integer programming. *Operations Research*, 41(4):649–654, 1993.
- [7] D. Goossens y F. Spieksma. Scheduling the belgian soccer league. *Interfaces*, 39(2):109–118, 2009.
- [8] INFORMS. O.R. transforms scheduling of Chilean Soccer Leagues and South American World cup qualifiers. Consultado en Mayo 31, 2016, [https://www.pathlms.com/informs/events/533/thumbnail\\_video\\_presentations/26171](https://www.pathlms.com/informs/events/533/thumbnail_video_presentations/26171), Mayo 2016.
- [9] G. Kendall, S. Knust, C.C. Ribeiro, y S. Urrutia. Scheduling in sports: An annotated bibliography. *Computers and Operations Research*, 37(1):1–19, 2010.

- [10] G.L. Nemhauser y M.A. Trick. Scheduling a major college basketball conference. *Operations Research*, 46(1):1–8, 1998.
- [11] K. Nurmi y J. Kyngäs. Improving the schedule of the Finnish Major Ice Hockey League. In *Proceedings of the 2nd International Conference on the Mathematics in Sport. Groningen, Netherlands*, 2009.
- [12] R.V. Rasmussen. Scheduling a triple round robin tournament for the best Danish soccer league. *European Journal of Operational Research*, 185(2):795–810, 2008.
- [13] D. Recalde, R. Torres, y P. Vaca. Scheduling the professional Ecuadorian football league by integer programming. *Computers and Operations Research*, 40(10):2478–2484, 2013.
- [14] C.C. Ribeiro. Sports scheduling: Problems and applications. *International Transactions in Operational Research*, 19(1-2):201–226, 2012.
- [15] C.C. Ribeiro y S. Urrutia. Scheduling the Brazilian soccer tournament: Solution approach and practice. *Interfaces*, 42(3):260–272, 2012.
- [16] C. Thielen y S. Westphal. Complexity of the traveling tournament problem. *Theoretical Computer Science*, 412(4):345–351, 2011.
- [17] M. Trick. Challenge traveling tournament instances. *Online reference at <http://mat.gsia.cmu.edu/TOURN/>*, Consultado el 7 de junio de 2016, 2016.
- [18] S. Westphal. Scheduling the German basketball league. *Interfaces*, 44(5):498–508, 2014.
- [19] M.B. Wright. Scheduling fixtures for New Zealand cricket. *IMA Journal of Management Mathematics*, 16(2):99–112, 2005.
- [20] M.B. Wright. Scheduling fixtures for basketball in New Zealand. *Computers and Operations Research*, 33(7):1875–1893, 2006.

