

La ciencia también entra a la cancha

ALBERTO ISAAC AGUILAR-HERNÁNDEZ Y MARKUS MÜLLER

El Dr. Aguilar Hernández obtuvo el doctorado en física por la UAEM. Es investigador posdoctoral en el Centro de Investigación en Ciencias (CInC) de la UAEM. En 2025 recibió el Reconocimiento al Mérito Estatal en Investigación (REMEI) en la categoría de Investigación científica (equipo). Su área de especialidad es el análisis de sistemas complejos y series de tiempo.

El Dr. Müller obtuvo el doctorado en física teórica por la Universidad de Dresde, Alemania. Es profesor investigador de tiempo completo en el CInC-UAEM. En 2025 recibió el premio REMEI en la categoría de Investigación científica (equipo). Su área de especialidad se enfoca en el análisis y la simulación de sistemas complejos, con especial atención a la dinámica cerebral. Es integrante de la Academia de Ciencias de Morelos. *Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.*

El primer Mundial de fútbol se celebró en Uruguay en 1930, con la participación de solamente 13 selecciones nacionales. La final enfrentó a Uruguay y Argentina, en un encuentro que terminó con victoria para el conjunto uruguayo por marcador de 4-2, convirtiéndose así en el primer campeón en la historia de la Copa del Mundo.

Desde entonces, este torneo se ha celebrado cada cuatro años y se ha consolidado como uno de los eventos deportivos más importantes del mundo. Las únicas excepciones ocurrieron en 1942 y 1946, cuando las ediciones fueron suspendidas debido a la segunda guerra mundial.

La Copa del Mundo de 2026 será histórica por varias razones. Por primera vez participarán 48 selecciones nacionales, convirtiéndose en la edición más grande celebrada hasta ahora, con 104 partidos distribuidos en 16 ciudades anfitrionas de tres países: México, Estados Unidos y Canadá.

Para México, esta edición representa algo aún más significativo. Nuestro país se convertirá en el primero en la historia en albergar tres copas masculinas mundiales, después de las celebradas en 1970 y 1986. Asimismo, el histórico Estadio Azteca será el primer estadio del mundo en recibir partidos inaugurales de tres mundiales distintos. A esto se suma la presencia de Gilberto Mora en la selección mexicana, quien, con 17 años y 240 días de edad, llega como el jugador más joven convocado para esta Copa del Mundo.

Pero el fútbol no es solo emoción, pasión y espectáculo. Detrás de cada disparo, cada pase y cada decisión táctica hay una enorme cantidad de ciencia. Aunque muchas veces pase desapercibida, disciplinas como la física, las matemáticas, la estadística y el análisis de datos forman parte del juego moderno.

Detrás de lo que vemos en la cancha ocurre mucho más que talento e improvisación. Por ejemplo, la trayectoria de

un disparo puede explicarse con las leyes del movimiento de la mecánica clásica, el efecto sobre el balón involucra a la dinámica de fluidos y la forma en que un equipo se organiza para defender o atacar puede estudiarse mediante la geometría. Incluso una secuencia de pases puede analizarse como una red de interacciones entre jugadores. A esto se suman la estadística, la biomecánica y, cada vez más, el análisis de datos y los algoritmos, que hoy forman parte de la preparación física y de muchas decisiones tácticas del fútbol moderno.

El efecto Magnus
Uno de los ejemplos más conocidos de cómo la ciencia aparece en el fútbol es el llamado "gol imposible" de Roberto Carlos (Figura 1). Pocos goles en la historia han despertado tanta curiosidad entre físicos y aficionados como el que el futbolista brasileño marcó contra Francia el 3 de junio de 1997, durante un torneo de preparación rumbo a la Copa Mundial de 1998.

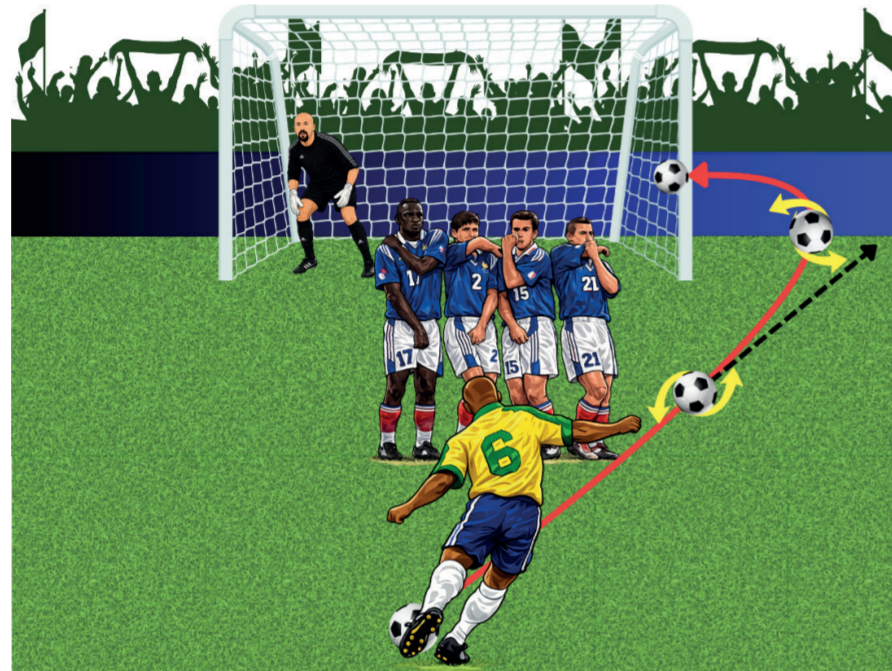


FIGURA 1. REPRESENTACIÓN esquemática del tiro libre ejecutado por Roberto Carlos frente a Francia en 1997. La trayectoria curva del balón surge de la combinación entre la velocidad inicial del disparo y la rotación impuesta al balón, generando una fuerza lateral asociada al efecto Magnus, que modifica progresivamente su recorrido durante el vuelo. Fuente: elaboración propia.

Corría el minuto 21 del encuentro entre Brasil y Francia. El marcador seguía empatado cuando Brasil obtuvo un tiro libre a unos 35 metros del arco, una distancia desde la que parecía más razonable enviar un centro que intentar un disparo directo.

Roberto Carlos acomodó el balón y tomó una gran distancia. Frente a él estaba la barrera francesa y, detrás de ella, el arquero Fabien Barthez. Con su característico impulso explosivo golpeó el balón con la parte externa del pie izquierdo, imprimiéndole una velocidad cercana a los 137 km/h y un efecto extraordinario. La pelota salió disparada con fuerza y durante los primeros instantes pareció desviarse completamente del arco. Desde la tribuna y desde la portería francesa, todo indicaba que el disparo terminaría fuera del campo. Sin embargo, cuando el balón avanzó varios metros comenzó a describir una curva inesperada.

La trayectoria fue cerrándose progresivamente hasta regresar hacia el arco. Barthez reaccionó demasiado tarde y el balón terminó entrando pegado al poste. Puede ver este fabuloso gol en <https://www.youtube.com/watch?v=crKwlbw-vr88>

Más que un gol espectacular, aquella jugada se convirtió en uno de los ejemplos más conocidos de cómo la física puede aparecer en una cancha de fútbol. Aunque a primera vista la trayectoria del balón parece desafiar la intuición, en realidad puede entenderse mediante las leyes clásicas del movimiento y la interacción entre un objeto en rotación y el aire que lo rodea.

Cuando Roberto Carlos golpeó el balón a la derecha de su centro con la parte externa del pie izquierdo, no solo le transfirió una gran velocidad hacia adelante, sino también una rotación intensa alrededor de su eje vertical (Figura 2A). Esa combinación entre traslación y giro fue la responsable de la trayectoria extraor-

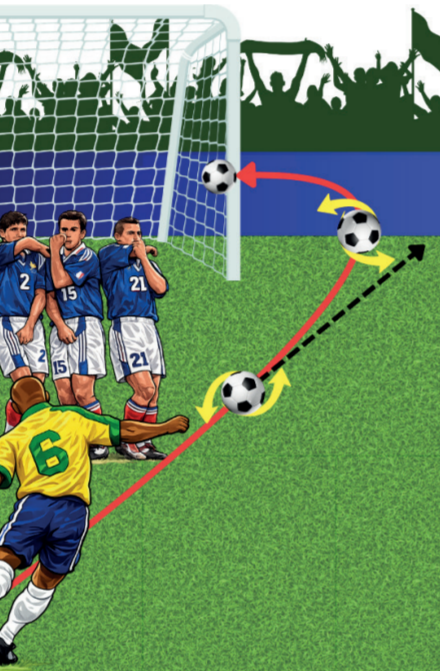


FIGURA 2. REPRESENTACIÓN esquemática del efecto Magnus. A) Al momento del impacto, se transfiere al balón una velocidad y rotación. B) La rotación modifica el flujo de aire alrededor del balón, generando diferencias de velocidad y presión entre ambos lados de su superficie y formando una estela turbulenta detrás del balón. Como resultado aparece una fuerza lateral que desvía progresivamente su trayectoria. Fuente: elaboración propia.

dinaria del disparo.

Para entender el fenómeno, imaginemos que el balón avanza mientras gira sobre sí mismo. Esa rotación modifica la forma en que el aire fluye alrededor de su superficie. En uno de los lados (lado izquierdo de la Figura 2B), el giro del balón favorece el movimiento del aire y aumenta su velocidad relativa respecto a la superficie del balón. En el lado opuesto ocurre lo contrario y el flujo se vuelve más lento (lado derecho de la Figura 2B). Esta diferencia de velocidades genera una diferencia de presiones. De acuerdo con la dinámica de fluidos, las regiones donde el aire se mueve más rápido presentan menor presión, mientras que donde el flujo es más lento la presión aumenta. Esta relación puede describirse mediante el principio de Bernoulli.

Sin embargo, el principio de Bernoulli por sí solo no basta para explicar la trayectoria curva del balón. Cuando el balón gira mientras avanza, la capa de aire que está en contacto con su superficie también se ve afectada por esa rotación. Debido a la viscosidad del aire, el flujo cercano al balón no se desliza libremente, sino que tiende a acompañar parcialmente el movimiento de la superficie. Como resultado, en uno de los lados el flujo permanece adherido durante más tiempo, mientras que en el lado opuesto se separa antes.

Esta asimetría modifica la forma en que el aire rodea al balón y altera la distribución del flujo detrás de él. En esa región se forma una estela turbulenta, es decir, una zona donde el aire se mueve de manera irregular después de separarse de la superficie del balón. Como esa estela no queda distribuida simétricamente, el balón desvía el aire preferentemente hacia uno de los lados. De acuerdo con la conservación del momento lineal, si el balón desvía el aire preferentemente hacia un lado, el aire ejerce sobre él una fuerza de reacción en sentido contrario. Esa fuerza lateral es la responsable de que la trayectoria deje de ser recta y aparezca la curvatura del tiro. Este fenómeno se conoce como el efecto Magnus [1].

En el disparo de Roberto Carlos, esa fuerza lateral actuó durante todo el vuelo del balón. Sin embargo, la curvatura no fue evidente desde el inicio. Durante los primeros metros predominó la gran ve-

locidad hacia adelante, haciendo que el balón pareciera alejarse de la portería. Conforme avanzó y perdió velocidad debido a la resistencia del aire, la desviación lateral comenzó a hacerse cada vez más visible.

La distancia del disparo también fue un elemento importante. Si el disparo hubiera sido más cercano, el balón probablemente habría terminado en la tribuna. En cambio, al recorrer más de treinta metros, el efecto Magnus tuvo tiempo suficiente para modificar gradualmente la trayectoria del balón y producir la famosa curva. Este gol fue el resultado de una combinación extraordinariamente precisa entre velocidad inicial, rotación, tiempo de vuelo y resistencia del aire.

La trayectoria del disparo fue tan inusual que el gol de Roberto Carlos dejó de ser solo una jugada memorable y terminó llamando la atención de la comunidad científica.

Años después del partido, un grupo de físicos franceses se propuso estudiar si era posible reproducir aquella curva utilizando únicamente las leyes de la mecánica y la dinámica de fluidos. El trabajo [2], publicado en 2010, partió de una pregunta aparentemente sencilla: ¿puede la física explicar por completo el famoso gol de Roberto Carlos? Para responderla, los autores desarrollaron un modelo matemático que describe el movimiento de una esfera que avanza mientras gira dentro de un fluido. En el modelo consideran las tres fuerzas principales que actúan sobre un balón durante el vuelo: 1) la gravedad, responsable de atraerlo hacia el suelo, 2) la resistencia del aire, que reduce progresivamente su velocidad y 3) el efecto Magnus, que desvía lateralmente la trayectoria.

Los resultados mostraron que la curvatura del balón no aparece de manera uniforme durante todo el recorrido. Al inicio del disparo, la velocidad hacia adelante es tan grande que el balón parece desplazarse casi en línea recta. Sin embargo, conforme avanza, el rozamiento con el aire reduce progresivamente su velocidad de traslación.

La clave está en que la rotación del balón disminuye más lentamente que su velocidad de avance. Como consecuencia, el efecto Magnus adquiere una influencia cada vez mayor sobre el movimiento. En otras palabras, el balón no comienza a girar más al final del recorrido, simplemente avanza más lento mientras conserva suficiente rotación para que la desviación lateral se vuelva más evidente. Los investigadores encontraron que, bajo ciertas condiciones de velocidad inicial, rotación y distancia recorrida, la trayectoria deja de parecer un arco convencional y comienza a adoptar una forma semejante a una espiral abierta. Desde la perspectiva del observador, esto genera la impresión de que el balón cambia de dirección en el último momento.

Hasta ahora hemos visto cómo la física puede explicar la trayectoria de un solo disparo. Pero en el fútbol no todo depende del balón ni del talento individual. También importa cómo los jugadores ocupan el espacio y cómo se distribuyen sobre la cancha.

Más allá de correr, pasar o disparar, una parte importante del juego consiste en controlar regiones del terreno y limitar las opciones del rival. Esto nos lleva a una pregunta: ¿quién controla realmente el espacio dentro de la cancha?

El diagrama de Voronoi

En 2018, durante la fase de grupos de la Copa Mundial en Rusia, México se enfrentó a Alemania en el Estadio Luzhnikí de Moscú. El reto parecía enorme, pues Alemania llegaba como campeón vigente y uno de los principales favoritos del torneo.

Corría el minuto 35 del primer tiempo. Alemania dominaba la posesión y ocupaba gran parte del campo rival, mientras México resistía y esperaba el momento adecuado para atacar.

Entonces Javier Hernández recibió el balón cerca del medio campo y avanzó unos metros, atrayendo a los defensores y abriendo un espacio por el costado izquierdo. En ese instante apareció Hirving Lozano entre dos rivales. Hernández filtró el pase, Lozano controló dentro del área, dejó atrás a un defensor con un recorte y definió cruzado con la pierna derecha. El balón superó al arquero y terminó dentro de la portería.

El gol no nació únicamente del talento individual. Fue el resultado de cómo el movimiento coordinado de varios jugadores reorganizó el espacio dentro de la cancha y creó una oportunidad de ataque donde antes no parecía existir. Sorprendentemente, este tipo de situaciones puede describirse mediante una herramienta matemática llamada diagrama de Voronoi. Y quizá lo más interesante es que la misma idea también se utiliza para estudiar problemas tan distintos como la distribución de ciudades, la propagación de epidemias, la formación de galaxias o la organización de tejidos biológicos.

La idea detrás de los diagramas de Voronoi tiene una historia mucho más antigua que el propio fútbol. Desde hace siglos, distintos científicos y matemáticos han utilizado formas de dividir el espacio para estudiar problemas muy diversos. Entre ellos se encuentra René Descartes, quien exploró construcciones geométricas relacionadas con la partición del espacio.

En el siglo XIX, el médico John Snow utilizó ideas semejantes para investigar la propagación del cólera en Londres. Más tarde, a principios del siglo XX, el matemático ruso Georgy Voronoi desarrolló el marco matemático que formalizó estas ideas y dio origen al concepto que se utiliza actualmente [3].

De manera sencilla, un diagrama de Voronoi permite dividir un espacio en regiones a partir de la distancia hacia un conjunto de puntos. Cada región reúne todos los lugares que están más cerca de uno de esos puntos que de cualquier otro.

El resultado es una partición del espacio en polígonos, que muestran zonas de influencia. Las fronteras entre regiones aparecen en lugares que están exactamente a la misma distancia entre puntos vecinos, mientras que los vértices corresponden a posiciones donde varias regiones compiten simultáneamente por el control del espacio.



FIGURA 3. DIAGRAMA de Voronoi para una cancha con dos jugadores. Las regiones muestran qué zonas del campo están potencialmente bajo el control de cada jugador, asumiendo que ambos tienen las mismas capacidades físicas y técnicas. La frontera entre ambas corresponde al conjunto de puntos que se encuentran a la misma distancia entre los dos jugadores. Fuente: elaboración propia.

La idea puede entenderse mejor con un ejemplo. Imaginemos una cancha de fútbol en la que solo hay dos jugadores, uno amarillo y otro verde, ubicados como se muestra en la Figura 3. Para simplificar, supongamos que ambos tienen las mismas capacidades físicas y técnicas.

En esta situación, la cancha queda dividida en dos regiones: una formada por todos los pun-

tos que están más cerca del jugador amarillo (zona amarilla) y otra compuesta por los puntos más cercanos al jugador verde (zona verde). La frontera entre ambas regiones está formada por todos los puntos que se encuentran exactamente a la misma distancia de ambos jugadores. Geométricamente, esta frontera corresponde a la recta mediatriz del segmento que une sus posiciones.

Este diagrama permite visualizar la zona de influencia de cada jugador. En otras palabras, si el balón apareciera en cualquier lugar de la cancha, el diagrama indicaría cuál de los dos jugadores tendría ventaja para llegar primero. Ahora imaginemos una situación más realista. Sobre la cancha se encuentran dos equipos, el equipo verde y el equipo amarillo, cada uno con 11 jugadores. Durante el partido, todos están en movimiento y sus posiciones cambian continuamente. Pero si congelamos el juego en un instante determinado, podemos construir el diagrama de Voronoi que aparece en la Figura 4.

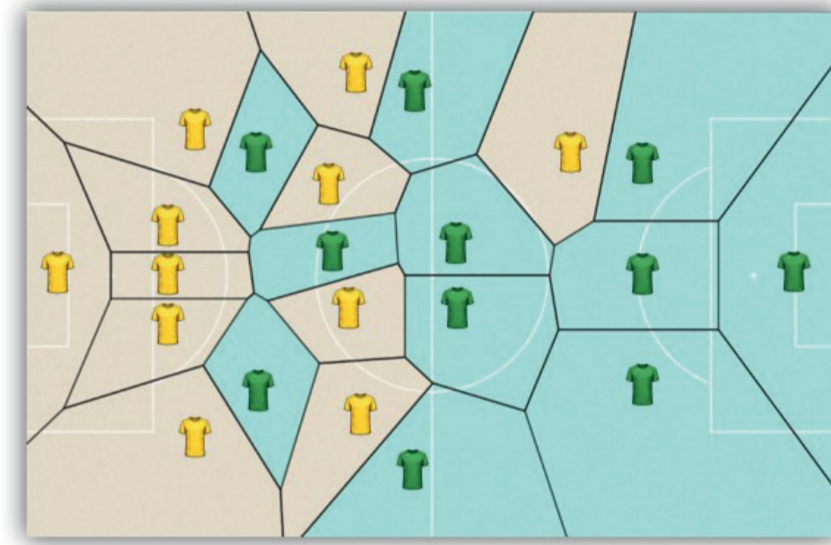


FIGURA 4. DIAGRAMA de Voronoi para una cancha con dos jugadores. La cancha se divide en regiones de influencia asociadas a cada jugador según su proximidad, generando una representación simplificada del control del espacio durante el juego. Fuente: elaboración propia.

El diagrama proporciona una partición de toda la cancha en regiones de influencia, cada zona queda asociada al jugador que se encuentra más cerca de ella. Lo que obtenemos es una fotografía instantánea del control del espacio dentro del partido.

Las regiones más grandes suelen indicar jugadores con mayor acceso al espacio y más opciones de movimiento. En cambio, las regiones pequeñas aparecen con frecuencia en zonas congestionadas, donde la presión rival limita las alternativas de juego o donde los propios compañeros terminan ocupando espacios similares.

Referencias

- J. Tagüeña y J. Flores, La física del futbol, Revista ¿Cómo ves? No. 92, p.31 (2006)
- Dupeux, G., Goff, A. L., Quéré, D., & Clanet, C. (2010). The spinning ball spiral. *New Journal of Physics*, 12(9), 093004. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/12/9/093004/pdf>
- Aurenhammer, F., & Klein, R. (1996). *Voronoi diagrams*. Fernuniv., Fachbereich Informatik. https://ub-deposit.fernuni-hagen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/mir_derivate_00001265/Aurenhammer_Klein_Voronoi_Diagrams_1996.pdf
- Feder, T. (2006). Soccer obeys Bessel-function statistics. *Physics Today*, junio 1, 2006. <https://physicstoday.aip.org/news/soccer-obeys-bessel-function-statistics>

La respuesta es que puede ser muy útil, pero tiene limitaciones. En nuestro ejemplo asumimos que todos los jugadores tienen las mismas capacidades físicas, que pueden moverse con igual velocidad en cualquier dirección y que llegarían al balón únicamente dependiendo de la distancia. En un partido real, nada de esto ocurre.

Un jugador en reposo no reacciona igual que uno que ya está en movimiento. La orientación del cuerpo influye en la velocidad de respuesta y un futbolista rápido puede alcanzar zonas que, según el modelo, parecerían pertenecer al rival. Además, el juego no depende solo de posiciones instantáneas. También intervienen la velocidad, la aceleración, el cansancio y las decisiones tácticas.

Por esta razón, el análisis deportivo moderno suele utilizar modelos más avanzados conocidos como modelos de control del espacio (*pitch control models*). En lugar de dividir la cancha únicamente por distancia, estos modelos estiman qué jugador o equipo tendría

mayores posibilidades de controlar el balón en cada región considerando el tiempo de reacción, la velocidad máxima de movimiento y otros factores dinámicos.

Todo esto muestra que la ciencia no solo sirve para explicar fenómenos naturales, también ofrece nuevas formas de comprender actividades humanas tan complejas y apasionantes como un partido de fútbol [4]. La próxima vez que vea un disparo con efecto, un pase entre líneas o una jugada que parece surgir de la nada, recuerde que en la cancha no solo entran los jugadores. También entran la física, las matemáticas y el análisis científico.

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos.



ESTA PUBLICACIÓN FUE REVISADA POR EL COMITÉ EDITORIAL DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS

Para actividades recientes de la academia y artículos anteriores puede consultar: www.acmor.org
¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? **CONTÁCTANOS:** coord.comite.editorial.acmor@gmail.com