

# Potencialidades de los celulares inteligentes para investigaciones biológicas. Parte 1: Sensores integrados

## *Potentials of smartphones for biological research. Part 1: Integrated Sensors*

Dennis Denis<sup>1\*</sup>, Daryl D. Cruz Flores<sup>2</sup>, Yarelys Ferrer-Sánchez<sup>3</sup> y Fermín L. Felipe Tamé<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Biología, Universidad de La Habana, Cuba. C.P. 10400. <sup>2</sup> Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México. <sup>3</sup> Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador. <sup>4</sup> Jardín Botánico Nacional, Universidad de La Habana, Cuba. C.P. 19230.

\* Autor para correspondencia: [dda@fbio.uh.cu](mailto:dda@fbio.uh.cu)

### RESUMEN

Los teléfonos celulares han irrumpido en todos los aspectos de la vida de la mayor parte de la humanidad, incluyendo las actividades profesionales y científicas. Numerosas aplicaciones apoyan al investigador en el seguimiento de protocolos experimentales, manejo de bibliografía y como vía de conexión inalámbrica con otros equipos. Pero la amplia gama de sensores miniaturizados integrados que poseen, de alta precisión y que actúan en aspectos ocultos del funcionamiento del equipo, no ha sido aún lo suficientemente explotada. Los celulares modernos contienen potentes cámaras digitales, micrófonos, receptores GPS/GNSS, acelerómetros, giroscopios, sensores de magnetismo, luxómetros, barómetros, termómetros, sensores de humedad, sensores biométricos y muchos otros, que tienen el potencial de convertirse en importantes aliados para la recolección de datos durante el trabajo de un investigador. A partir de ellos han aparecido las aplicaciones de brújulas, altímetros, escáneres, lectores de códigos de barras o QR, identificadores de rostros, sonidos o especies, detectores de metales, de movimientos o de vibraciones, podómetros, colorímetros, espectrómetros y muchas más. Todas estas herramientas están impactando un amplio espectro de campos científicos como la medicina, las ciencias sociales, el monitoreo ambiental, el transporte y la industria. Sin embargo, aún existe desconocimiento de sus ventajas y posibilidades, por lo cual, en este trabajo, se hace una revisión de las potencialidades que brindan estos sensores y sus aplicaciones en las investigaciones biológicas. En condiciones donde el equipamiento tecnológico es limitado, los celulares, sus sensores y las aplicaciones correspondientes pueden ser alternativas eficientes para sobrelevar la brecha tecnológica y aumentar la calidad de las investigaciones.

**Palabras clave:** brecha tecnológica, herramientas alternativas, sensores microelectrónicos, teléfonos

### ABSTRACT

Smartphones have irrupted in every facets of modern life for most of the humankind, including professional and scientific activities. Many apps exist to help in guiding experimental protocols, literature management and wireless connection to other equipment. But the wide range of miniaturized integrated sensors, of high accuracy that act in hidden aspect of cellphone functioning, has not yet been fully explored. Modern smartphones contain powerful digital cameras, microphones, GPS/GNSS receivers, accelerometers, gyroscopes, magnetism sensor, light sensors, barometers, thermometers, moisture sensors, biometric sensors and many others with the potential of became important allied for researcher's data collect during his work. Based on them, had emerge compasses, altimeters, scanners, barcode or QR readers, face, sounds or species identification apps, metal detectors, movement and vibration detectors, pedometers, colorimeter, spectrophotometer and many others. All this tools are producing a high impact in many scientific fields such as medicine, social sciences, environmental monitoring, transportation and industry. The advantages and possibilities of these sensors for biological investigations are still unknown. For this reason, the present paper is a review of the potentials associated to common modern smartphones sensors and its applications in biological researches. In conditions were technical equipment is limited, smartphones, its sensors and corresponding apps can be reasonably efficient alternatives to overcome the technological breach and to increase quality of researches.

**Keywords:** technological breach, alternative tools, microelectronic sensors, phones

**Citación:** Denis, D., Cruz, D.D., Ferrer-Sánchez, Y. & Felipe, F.L. 2021. Potencialidades de los celulares inteligentes para investigaciones biológicas. Parte 1: Sensores integrados. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 42: 77-91.

**Recibido:** 17 de septiembre de 2020. **Aceptado:** 25 de enero de 2021. **Publicado en línea:** 26 de abril de 2021. **Editor encargado:** Luis Manuel Leyva

### INTRODUCCIÓN

Los teléfonos celulares se han convertido en la actualidad en una herramienta de uso diario en la vida de una proporción significativa de personas, se estiman más de 3,5 billones de usuarios en el 2020 (Statista 2020). Los celulares con sistemas operativos y capacidades de cómputo, que les atribuyeron el epíteto de "inteligentes" (o *smartphones* en inglés) aparecieron en la primera década del siglo XXI, con el lanzamiento del primer modelo por la compañía Apple (*iPhone* 1). Ya a finales de esa década existían más de cuatro billones y medio de

líneas celulares y alrededor de la quinta parte eran equipos inteligentes (Ericsson 2013), lo que contribuyó al nacimiento de la tercera generación de internet: la IoT (*Internet of Things*), definida por el momento en que existieron ya más equipos que personas conectados *on-line* (Damani & al. 2018). En la actualidad, el desarrollo de esta tecnología ha resultado en equipos electrónicos portables altamente sofisticados, a nivel de una microcomputadora pequeña y de alta potencia de cálculo (Lane & al. 2010). Los celulares inteligentes han coevolucionado con otros dispositivos móviles como las

tabletas (*tablets*), y como ellos, además de su función para la comunicación y la conectividad a internet, poseen la capacidad de vincularse con otras máquinas por protocolos inalámbricos, lo cual permite su uso como interfaz para muchos equipos externos.

Por sus potencialidades, la comunidad científica se apropió desde el inicio de los múltiples servicios de los teléfonos inteligentes. En febrero de 2010 la editorial de *Nature methods* se tituló: “*The scientist and the smartphone*” y analizó la incorporación de estos equipos a la actividad científica. Al inicio de esta comunicación se señalaba: “hace un tiempo los teléfonos se usaban para hablar con otras personas y las computadoras para ejecutar programas. Ahora vemos a los científicos hablando con otros por la computadora y ejecutando sus programas en los teléfonos...”. Un número muy alto de aplicaciones se han enfocado en la actividad científica: desde aquellas para generar números aleatorios, calcular como preparar soluciones, ver información de enzimas de restricción, seguir protocolos experimentales, monitorear el crecimiento de colonias bacterianas, calcular conversiones de unidades, buscar artículos en bases de datos, descargarlos y almacenarlos, etc.

La posibilidad de escanear códigos de barras mediante aplicaciones digitales abre posibilidades organizativas para muestras y reactivos en los laboratorios y almacenes, a la vez que permite acceder rápidamente a información técnica o de seguridad para cualquier producto (*Nature America* 2010). Elsevier desarrolló el *Hivebench lab notebook*, una aplicación que permite que los científicos preparen, conduzcan y analicen experimentos en sus dispositivos inteligentes (<https://apps.apple.com/us/developer/elsevier-inc/id367031326>). Otras empresas comerciales enfocadas en productos de investigación han diseñado sus propias aplicaciones: BioRad, por ejemplo, tiene una aplicación para cuantificar las Reacciones en Cadena de la Polimerasa (PCR) (Gou & al. 2018). Las aplicaciones *GelApp* (*Android*) y *MyGels* (*iOS*) convierten los teléfonos en sistemas portables para documentar los geles en análisis de ADN y proteínas (Ken-En 2015). Dispositivos miniaturizados portables que se conectan a los celulares se han desarrollado para detecciones en tiempo real de VIH (Mauk & al. 2017), H1N1 (Qiu & al. 2017) y otras enfermedades. De esta forma se ha conformado lo que se conoce como ‘*lab in a phone*’ (Kwok 2009). Numerosos programas de recolecta de información y monitoreo en Epidemiología y Ecología se han basado en las posibilidades de los teléfonos y su conectividad (Aanensen & al. 2009), además de ser un instrumento esencial en programas de ciencia ciudadana (Bonney & al. 2009, Newman & al. 2012).

Sin embargo, una de las potencialidades mayores y más ignoradas de los celulares inteligentes radica en la amplia gama de sensores integrados, de relativamente alta precisión, que han incorporado a lo largo de su desarrollo. Los modelos modernos contienen potentes cámaras digitales, micrófonos, GPS, acelerómetros, giroscopios, sensores de magnetismo, luxómetros, barómetros, termómetros, sensores de humedad

del aire, sensores biométricos y muchos otros, que tienen el potencial de convertirse en importantes aliados para la recolecta de datos durante el trabajo de campo de un investigador (Welsh & France 2012, Khan & al. 2013). La mayoría de estos sensores actúan en aspectos ocultos del funcionamiento del equipo, pero terceras aplicaciones son capaces de interceptar sus registros y aplicarlos a otras funciones. Así, han aparecido las brújulas, altímetros, escáneres de huellas digitales o de iris, lectores de códigos de barras o QR, identificadores de rostros y voces, detectores de metales, detectores de movimientos o de vibraciones, podómetros, fotómetros, colorímetros y espectrómetros. Muchos prototipos de celulares se están produciendo con nuevas generaciones de sensores, como los gravitatorios, detectores de UV, barómetros (Honicky & al. 2008) y hasta existe un modelo japonés que puede detectar niveles de radiactividad.

Además de los sensores integrados, se ha desarrollado toda una industria de sensores externos que se vinculan a los celulares inteligentes, y con aplicaciones especializadas permiten monitorear el ritmo cardíaco, la presión sanguínea (Poh & al. 2009), los niveles de azúcar en la sangre (Garnweidner-Holme & al. 2015) y muchos otros aspectos de la salud. Todos estos elementos impactan en un amplio espectro de campos científicos como la medicina (Nusser & al. 2001), las ciencias sociales (Harari & al. 2016), los monitoreos ambientales (Conrad & Hilchey 2011, Andrachuk & al. 2019), el transporte (Das & Winter, 2018) o la industria (Thiagarajan & al. 2009). De manera global, han surgido nuevas áreas de investigación y servicios como el *mobile phone-sensing* (Lane & al. 2010), el *mobile-health* (Poh & al. 2009) y el *mobile-learning* (Jonas-Dwyer & Pospisil 2004). Su uso en medicina y epidemiología ha sido tan extensivo que Teacher & al. (2013) le llamaron una “app-idemia” (con más de 100 publicaciones científicas identificadas que los utilizaban).

Si se tiene en cuenta el pequeño tamaño y peso, duración de la batería y la seguridad física que implica portar equipos más compactos y funcionales, los celulares se están haciendo mucho más eficientes que las computadoras portables y las cámaras fotográficas para actividades de campo. A la vez, mantienen adecuados servicios en términos de capacidad de almacenamiento y velocidad de procesamiento, además de la conectividad inalámbrica (Lane & al. 2010). Por estas razones, estos equipos han penetrado lentamente en las investigaciones de campo (Palumbo & al. 2012). Una búsqueda de la palabra clave “*smartphone*” en la Red de la Ciencia (*WoS, Thomson Reuters, http://wokinfo.com/*) resultó en 1258 publicaciones (desde 2003 en adelante y con crecimiento exponencial).

Aunque los teléfonos inteligentes están siendo utilizados por una gran proporción de los investigadores, muchos no están totalmente conscientes del potencial que ofrecen como instrumentos profesionales. En trabajos de campo su empleo ha sido incluso menor y puede considerarse que están siendo sub-utilizados. Posiblemente, en esto influya una combinación de desconocimiento de sus ventajas y posibilidades, con

desconfianza del valor de sus sensores para la actividad científica, al asociarse instintivamente a áreas informales de la actividad diaria. Sin embargo, existen numerosas aplicaciones que se han diseñado y desarrollado para proveer facilidades a los investigadores de estos campos, con un extenso volumen de publicaciones que las validan científicamente (Snaddon & al. 2013, Teacher & al. 2013). En condiciones donde el equipamiento tecnológico es limitado, los celulares, sus sensores y las aplicaciones correspondientes pueden ser alternativas muy eficientes para sobrellevar la brecha tecnológica y aumentar la calidad de las investigaciones.

Por estas razones, en el presente trabajo se hace una revisión de las potencialidades que brindan los sensores más comunes que se han integrado en los celulares inteligentes modernos y sus aplicaciones en las investigaciones biológicas, a partir del análisis de experiencias publicadas a nivel mundial.

## DESARROLLO

Los celulares pueden brindar un apoyo invaluable a la actividad científica, la salud humana o incluso la protección del medio ambiente, y el número de publicaciones científicas que se enfocan en ellos o los emplean mantiene una tendencia creciente (Figura 1). En el año 2019, según la base de datos de PubMed, fueron publicados 1455 artículos relacionados con salud humana (palabras clave “*Smartphone AND health*”), 1048 relacionados con ciencia (“*Smartphone AND science*”) y 254 relacionados a medio ambiente (“*Smartphone AND environment*”). Otros 313 artículos se relacionaron a los sensores de los teléfonos, y específicamente 141 a la cámara fotográfica y 45 a los GPS/GNSS. Esta tendencia demuestra el interés creciente en el empleo de estos dispositivos móviles en actividades científico-profesionales.

En la investigación, el empleo de los teléfonos celulares puede desarrollarse por medio de tres aspectos principales: (1) los servicios de comunicación, (2) la capacidad de conectarse con aditamentos, equipos o sensores externos y (3) por los sensores electrónicos integrados que poseen. Los servicios de comunicación no se refieren al rol primario de los teléfonos para comunicarse entre personas, sino que incluye el empleo de aplicaciones informativas o educativas (en las que fluye información hacia los usuarios) y de aplicaciones que generan y transmiten datos (información que fluye desde los usuarios). El foco de la presente revisión se hace en el último de estos aspectos, o sea, las aplicaciones relacionadas con los sensores en estos equipos.

### Sensores de los teléfonos y sus aplicaciones

Los sensores integrados de los teléfonos pueden clasificarse en seis grupos (Figura 2): sensores de imágenes, sensores ambientales, sensores de movimiento, sensores de posición, sensores biométricos y sistemas de conectividad. Los sensores más conocidos y extendidos son las cámaras digitales, el micrófono, el receptor GPS, el acelerómetro y el giroscopio. Estos permiten a los usuarios regulares tomar fotografías y videos, hablar y grabar las conversaciones, determinar las

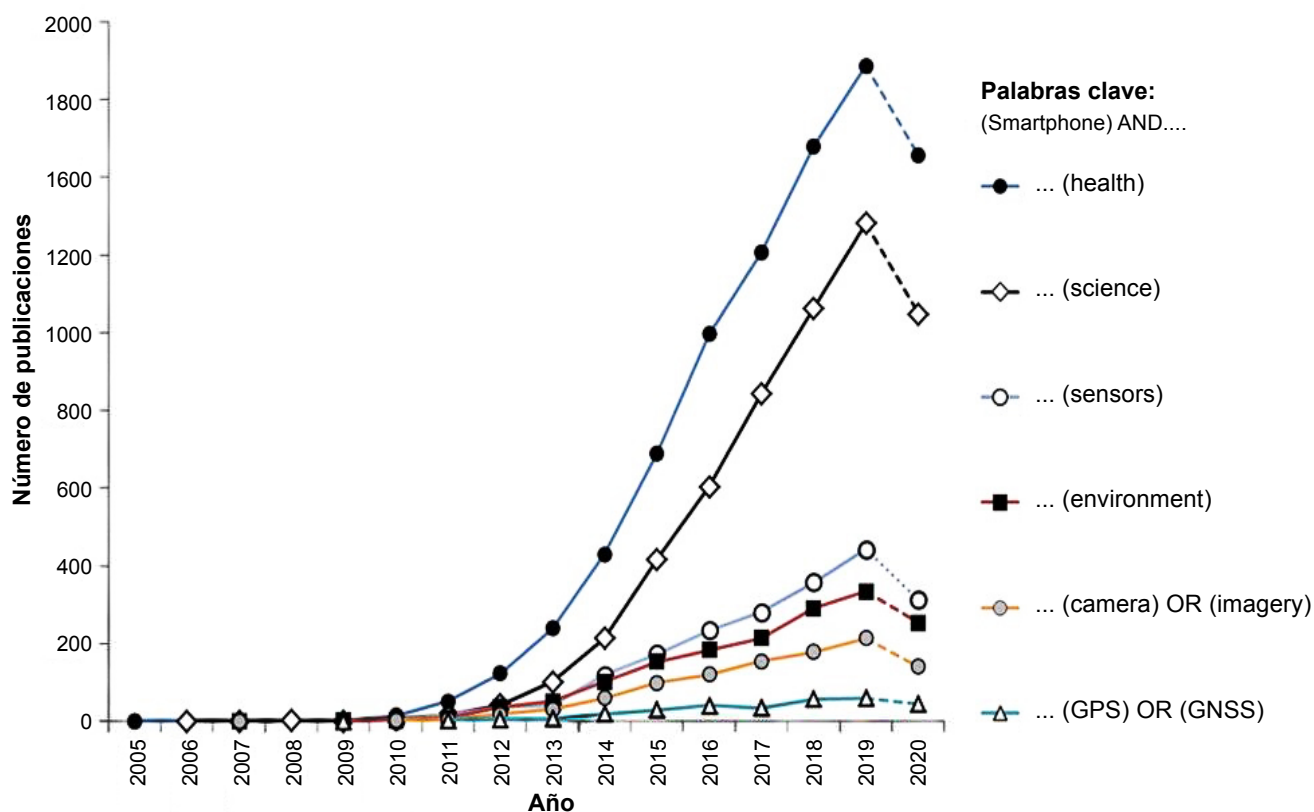
coordenadas donde se encuentra, para emplear los servicios relacionados con la ubicación espacial, y detectar movimientos. Estos cinco sensores mantienen detrás un gran número de aplicaciones especializadas de las cuales muchas veces no se tiene consciencia y que ameritan un énfasis particular. Algunas de las potenciales aplicaciones para la investigación aparecen en la Tabla I.

Las cámaras fotográficas de los celulares en la última década han tenido un desarrollo significativo mediante el aumento de la resolución y calidad de las imágenes hasta niveles casi profesionales. Por ello las aplicaciones de este sensor a tareas científicas son similares a las potencialidades de la fotografía digital con cámaras convencionales, y se han aplicado a un amplio campo de disciplinas, tanto en condiciones de laboratorio como de campo. Además del uso regular para la documentación de la investigación a partir de fotografías de las áreas de trabajo, especies, muestras o resultados, puede aprovecharse la capacidad para leer y registrar códigos de barras y QR, para desarrollar análisis morfométricos avanzados (morfometría geométrica) (por ejemplo: Kumar & al. 2016, Gurgel-Gonçalves & al. 2017) o para la implementación de sistemas de identificación automatizada de especies (Bolger & al. 2012, Hiby & al. 2013). Iliffe & al. (2011) crearon una aplicación para el conteo de flamencos en grandes bandos y Wong & al. (2016) desarrollaron otra aplicación para el conteo de colonias microbianas en cultivos de laboratorio.

Las cámaras de los celulares se han llegado a emplear como colorímetros (Wess 2017), fotómetros (Yang & al. 2018), espectrómetros (Wang & al. 2016), e incluso como microscopios de campo (Kim & al. 2015, Rather & al. 2019), con aditamentos ópticos adecuados (Figura 3). Un campo emergente se relaciona con el monitoreo de la radiación ultravioleta (Turner & al. 2019), ya que los sensores CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) son potencialmente capaces de detectar este tipo de radiación (Igoe & al. 2013).

Al igual que en las cámaras digitales un reciente avance de la tecnología celular es la capacidad de sus micrófonos integrados para registrar los niveles cada vez más precisos de sonidos y ruidos. Estos, además de su función básica de captar la voz para las comunicaciones, también permiten el registro de otros sonidos ambientales y se han usado ampliamente en investigaciones. Los estudios con estos micrófonos han ido desde aplicaciones bioacústicas sofisticadas para la identificación de especies y sonidos con procedimientos de aprendizaje de máquina, similares al de las aplicaciones *Siri* de Apple y *Alexa* de Android (Adams & al. 2012, Mennill & al. 2012), hasta estudios enfocados en la medición de las intensidades sonoras (Figura 4).

La organización *Rainforest Connection* (RFCx) (<https://rfcx.org/>) actualmente utiliza teléfonos reciclados para monitorear los sonidos asociados a talas ilegales en selvas tropicales que cuando detectan los sonidos de las sierras envían mensajes de alerta a las autoridades locales. Garrido & al. (2019) desarrollaron el *FrogPhone* un equipo para el monitoreo



**Fig. 1.** Comportamiento anual del número de artículos científicos publicados que aparecen en la base *PubMed*, recuperados con varias combinaciones de términos de búsqueda asociados a teléfonos inteligentes (*smartphones*).

**Fig. 1.** Annual trends in published scientific papers recovered from *PubMed* database, using several keywords combined to “*smartphone*”.

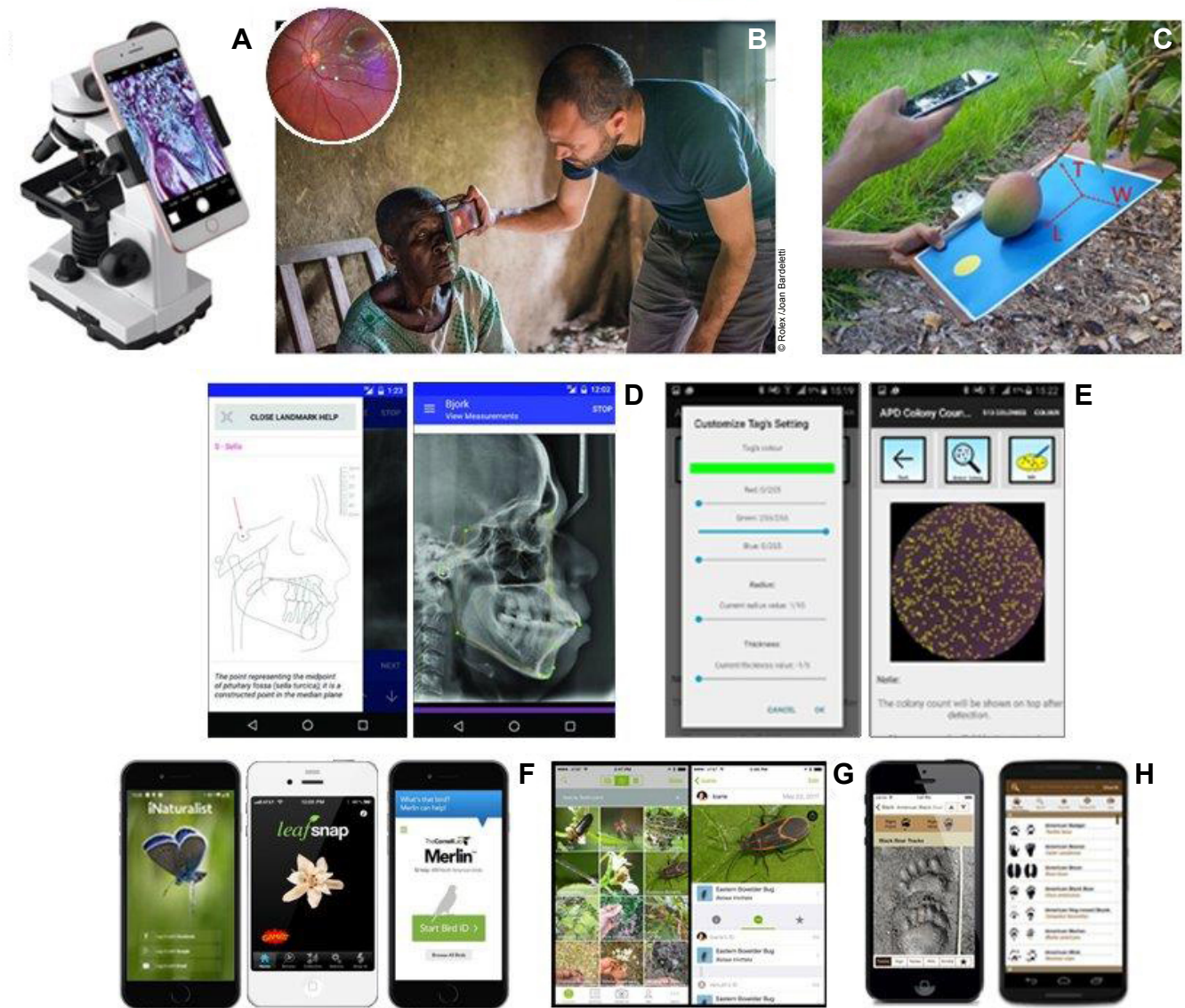


**Fig. 2.** Representación de los tipos de sensores que pueden encontrarse integrados en los circuitos de los teléfonos inteligentes modernos, con potenciales aplicaciones científicas, según la clasificación de Mendes & al. (2020).

**Fig. 2.** Representation of sensors types integrated into current smartphones technology, with potential scientific applications, according to Mendes & al. (2020) classification system.

acústico remoto de ensambles de anfibios en Australia, con partes de teléfonos celulares acoplados a pequeños paneles solares. Estos se activan cuando reciben una llamada y registran por varios minutos todos los sonidos, así como también envían de regreso un mensaje con el registro de la hora, la temperatura ambiental y la humedad del aire. El análisis bioacústico de los cantos de varias especies usadas como control tuvo calidad similar al de registros directos con equipos tradicionales.

Uno de los campos donde los micrófonos de los celulares inteligentes se han empleado más es en el monitoreo de la contaminación acústica o ruido ambiental (Lu & *al.* 2009, Ibekwe & *al.* 2016). Esta es la sumatoria de los factores de contaminación sonora: transporte, industrias, ruidos domésticos, actividades recreativas, etc. y puede llegar a ser un problema de salud ocupacional en muchas industrias y grandes urbes, con un impacto fisiológico severo (Smith 1988). La exposición a niveles elevados de ruido tiene consecuencias adversas



**Fig. 3.** Ejemplos de usos de las cámaras digitales de los teléfonos inteligentes en biología y medicina. **A.** Adaptador de un celular a un microscopio óptico. **B.** Oftalmólogo examinando la retina de una paciente con su celular. **C.** Mediciones automatizadas de frutos con la aplicación *FruitSize*. **D.** Análisis craneométrico con la aplicación *OneCeph*. **E.** Conteo de colonias microbianas con *APD Colony Counter*. **F.** Ejemplos de sistemas de identificación automatizada de especies: *iNaturalist*, *LeafSnap* y *Merlin*. **G.** Muestra de guías digitales de campo. **H.** Identificación de huellas de animales (*iTrack*).

**Fig. 3.** Use examples of smartphone digital camera in biology and medicine. **A.** Adapter of smartphone to a optic microscope. **B.** Ophthalmologist examining ocular fundus of a patient with his cell phone. **C.** Field automatized measurement of fruits with *FruitSize* app. **D.** Craneometric analysis with *OneCeph* app. **E.** Microbial colony count with *APD Colony Counter*. **F.** Examples of Automated Species Identification Systems: *iNaturalist*, *LeafSnap* and *Merlin*. **G.** Sample of digital field guides. **H.** Identification of animal footprints (*iTrack*).

como la degradación auditiva, aumento de la presión sanguínea, dificultades del sueño, irritación y estrés (Ologe & al. 2006, ONU 2009). El estudio de este tipo de contaminación ha tenido un avance notable en los últimos tiempos y varias aplicaciones se han desarrollado específicamente para ello: *EarPhone* (Kumar & al. 2010), *NoiseSPY* (Kanjo 2010) y *WideNoise* (Maisonneuve & al. 2010), entre otras.

Ibekwe & al. (2016) evaluaron la sensibilidad y validez de los registros de ruido en móviles en comparación con los equipos comerciales, y encontraron correlaciones muy altas ( $r=0,9$ ) y ausencia de diferencias estadísticas, con lo cual validaron que las aplicaciones pueden llegar a ser un método viable, barato, confiable y rápido para estudios de la intensidad de los ruidos (Fligor 2010, Galster 2013) en sustitución de instrumentos comerciales más caros. Si se usa en combinación con la potencia de la ciencia ciudadana se esperan muchos beneficios para identificar y controlar la contaminación sonora (D'Hondt & al. 2013). Desafortunadamente, hay pocos estudios sobre la utilidad de estas aplicaciones y no todas son suficientemente buenas, ya que otros estudios han encontrado altos niveles de error (Kardous & Shaw 2014). Para usarlos como instrumentos de registro siempre hay que tener en cuenta sus precisiones y evaluar si los errores están en los límites aceptables por las legislaciones apropiadas (por ejemplo: ANSI 1983).

La capacidad de registro del sonido, unido a sistemas cada vez más eficientes de reconocimiento de voz, han permitido el desarrollo de aplicaciones que llevan lo que una persona habla a texto y viceversa. La posibilidad de dictar puede permitir la sustitución de notas de campo o planillas de tomas de datos en papel por registros digitales, que pueden ser impresos, almacenados, transmitidos o subidos a repositorios en la nube, ya sea en tiempo real o posteriormente. En el campo de la educación científica, se han diseñado varios experimentos físicos acústicos mediante el uso de teléfonos inteligentes (Yavuz 2015, Hellesund 2019). Dado que muchos equipos modernos son a prueba de agua y sumergibles, Monteiro & Martí (2020) evaluaron el desempeño de celulares como hidrófonos en sencillos experimentos físicos para medir la velocidad del sonido en el agua, pero esto abre el camino a estudios acústicos en estos hábitats.

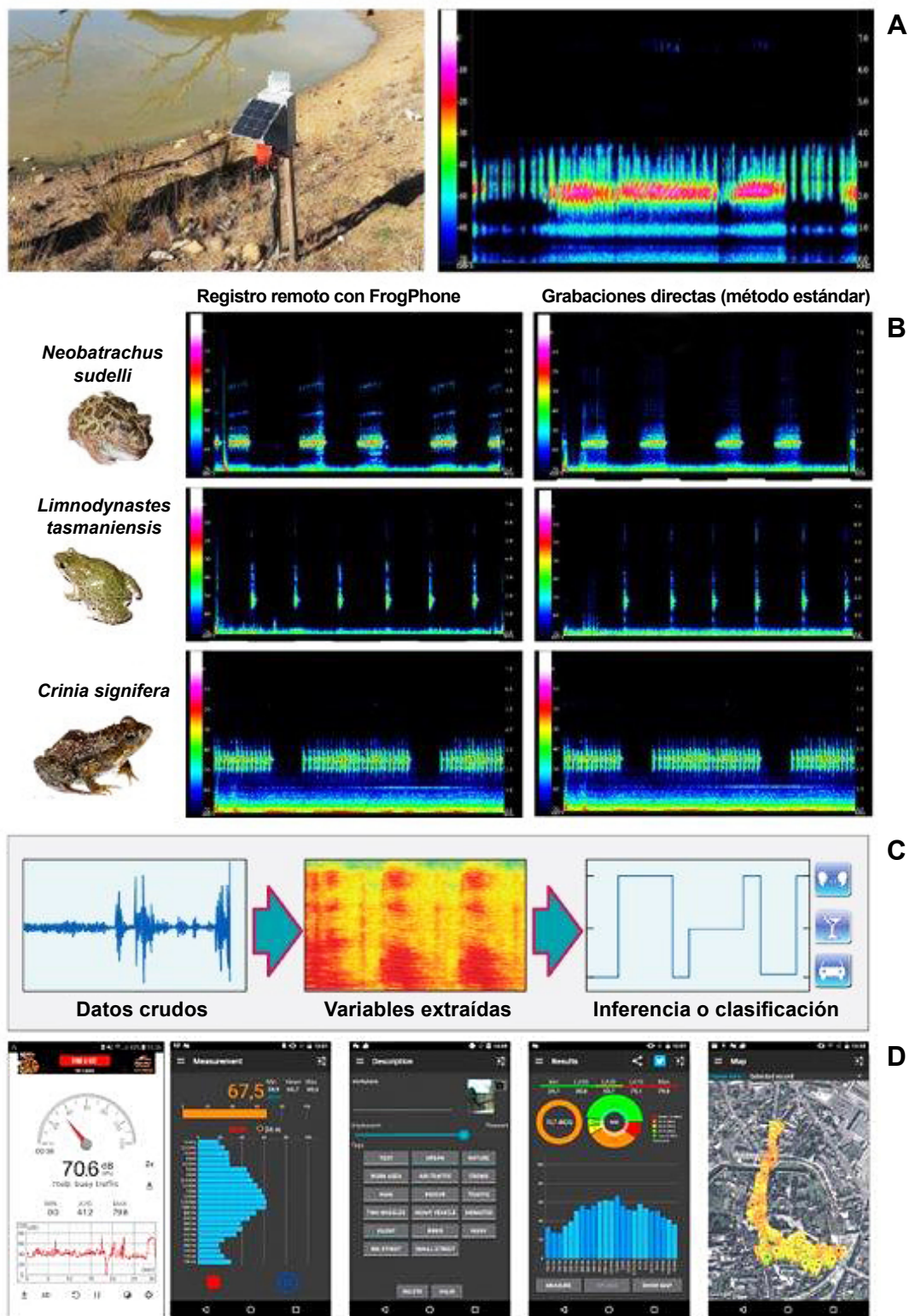
El tercero de los sensores más extendidos entre los dispositivos inteligentes son los receptores GPS (*Global Positioning System*) (aunque se debe generalizar al sistema GNSS: *Global Navigation Satellite System*). Los GPS son uno de los servicios satelitales que se ha convertido en herramientas de uso diario y fueron incorporados a los celulares para desarrollar los servicios basados en ubicación (*Location based services* - LBS), que permiten al celular acceder a información espacial personalizada en tiempo real por medio de las redes informáticas (Bauer 2013). Pero cuando las capacidades de generación de datos de los teléfonos se acoplan a los GPS, puede obtenerse información georreferenciada con la cual crear mapas de variación espacio temporal de muchos factores ambientales (Sicard & al. 2015).

La mayoría de los usos actuales de las capacidades de GPS de los celulares se relacionan con el transporte, seguimiento de direcciones (Nour & al. 2016, Das & Winter 2018), así como en el estudio de patrones de movimientos humanos (Zhou & Li 2018, Lue & Miller 2019) y monitoreo sanitario (Aranki & al. 2016, Obuchi & al. 2018). Durante la actual epidemia de neumonía de Wuhan en países como China, Ecuador, Colombia y Australia se han implementado aplicaciones para monitorear los movimientos de personas en cuarentena y con probabilidades de contagio de COVID-19 (BBC News, 11 de febrero 2020, <https://www.bbc.com/mundo/noticias-51467578>). Dentro del campo de la Ecología, las aplicaciones más primarias y extendidas se refieren al empleo de aplicaciones para registrar la ubicación de individuos de plantas y animales, así como el tiempo de eventos ecológicos como, por ejemplo, la floración de plantas. Las observaciones de campo, con fotos o datos georreferenciados, permiten crear mapas de propiedades ambientales y contribuyen, significativamente, a repositorios importantes de datos primarios de biodiversidad a través de sistemas como *eBird*, *iNaturalist* y otros. Aunque todavía existen reservas sobre la calidad de la ubicación obtenida a través de estos dispositivos, numerosos estudios han validado su uso (ver revisión en Denis & Cruz-Flores 2020).

En estudios ecológicos también se requiere muchas veces del empleo de instrumentos de medición de numerosas variables abióticas. El empleo de los celulares para la toma de estas variables puede hacerse de tres formas, en dependencia de: los sensores integrados internos, su conexión, directa o inalámbrica, a sensores externos (como *dataloggers* de condiciones climáticas o microcircuitos con GPS utilizados para seguimiento de animales en vida silvestre) o de la conexión a internet para descargar de la nube información satelital en tiempo casi-real para las coordenadas donde está ubicado el equipo.

Los sensores de proximidad y de iluminación ambiental, por ejemplo, fueron introducidos para mejorar la interacción entre el usuario y el equipo. El sensor de proximidad combina un LED infrarrojo y un sensor de luz y es el que desconecta la pantalla una vez se acerca al rostro para hablar. Este permite el ahorro de energía y es similar a los que se emplean en baños y en grifos de agua automáticos, así como en detectores de movimientos de sistemas de seguridad. Algunos modelos poseen sensores ultrasónicos, debido a que son mejores para medir distancias mayores, pero son mucho más costosos. Los sensores de iluminación ambiental son aquellos que permiten la regulación automática del brillo de la pantalla. Su sensibilidad, sin embargo, es suficiente para muchas otras aplicaciones (Sans-Tresserras & al. 2017). Dey & al. (2017) desarrollaron un sistema que emplea el luxómetro y un modelo de correlación para determinar la intensidad de radiación UV ambiental y Sriyanti & al. (2020), utilizaron los sensores de iluminación de teléfonos celulares para experimentos de mediciones de intensidad de la luz.

Aunque los sensores GPS informan al equipo de su ubicación, para los servicios asociados a la detección de la ubicación



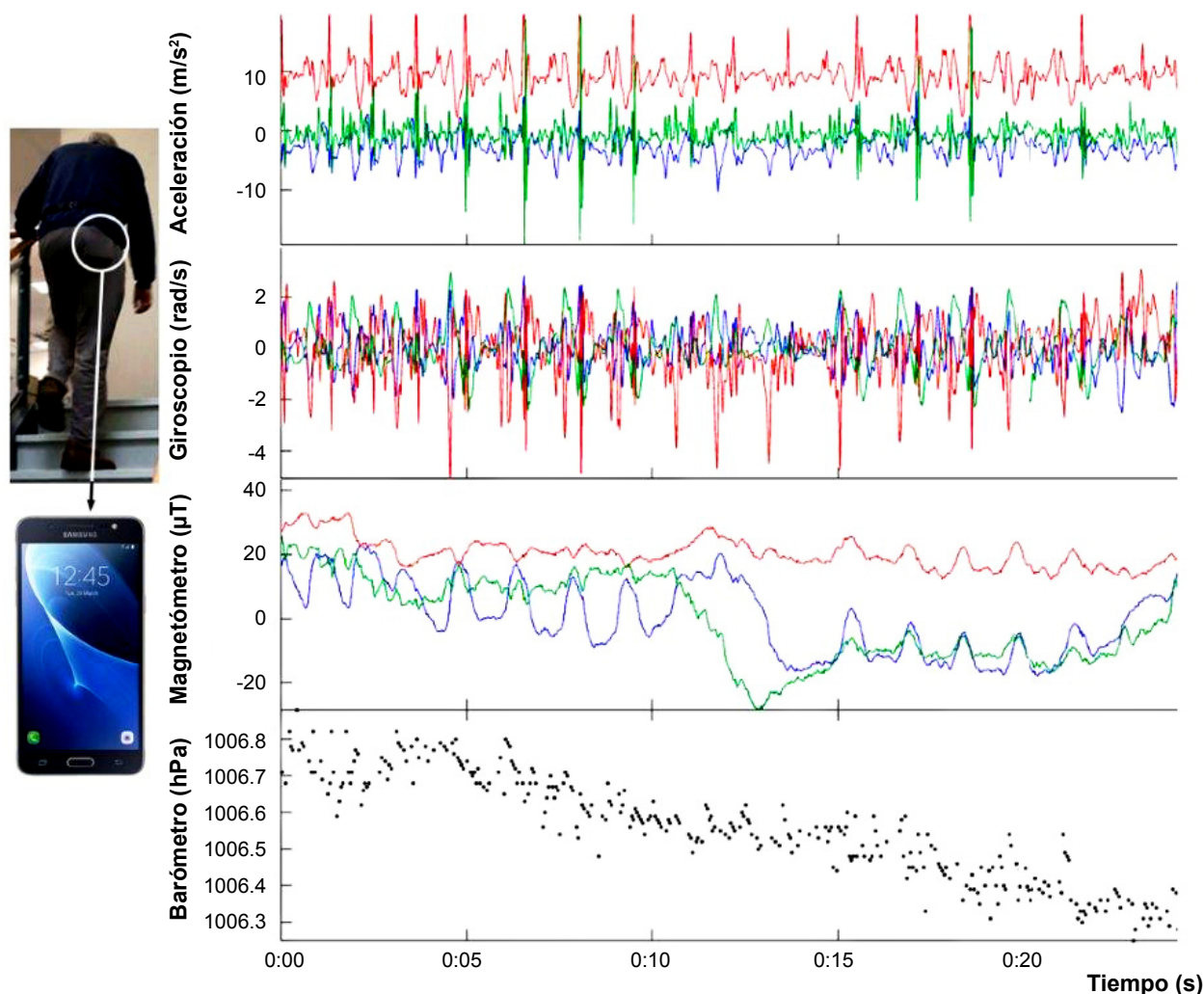
**Fig. 4.** Ejemplos de uso del micrófono de teléfonos inteligente para el estudio de sonidos. **A.** Vista del dispositivo *FrogPhone* y su registro de sonidos ambientales. **B.** comparación de los espectrogramas del canto de tres especies de ranas registrados con el micrófono de celulares y con métodos tradicionales (modificado de Garrido & al. 2019). **C.** Esquema del procesamiento de sonidos para análisis de actividades (modificada de Lu & al. 2009). **D.** Muestra de aplicaciones para el registro y mapeación de ruidos.

**Fig. 4.** Examples of smartphone use to study sounds. **A.** View of the *FrogPhone* device and its record of environmental sounds. **B.** comparison of song spectrograms in three frog species recorded with smartphone microphone and traditional methods (modified from Garrido & al. 2019). **C.** Diagram of sound processing to classify activities (modified from Lu & al. 2009). **D.** Examples of applications for registering, monitoring and mapping sounds.

espacial y el seguimiento de recorridos se necesitan otras informaciones para las cuales los teléfonos inteligentes contienen una tecnología llamada MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*) (Dabove & al. 2015). Esta incluye plataformas de sensores inerciales (*INS*) que mejoran estos servicios (Afzal & al. 2011, Niu & al. 2015) al identificar movimientos, orientaciones y direcciones. Los sensores de campo magnético se incluyeron como base de las brújulas, pero también pueden detectar otras fuentes de electromagnetismo. Los giroscopios de estructura vibrante y acelerómetros emplean la fuerza de Coriolis para detectar los movimientos. A través de todos ellos, mediante el empleo de los diferentes patrones de sus datos, pueden caracterizarse las actividades físicas del portador (por ejemplo: caminar, correr, detenerse). Estos sensores han sido muy empleados para apoyar la navegación en interiores donde se atenúan las señales GPS (Piras & al. 2014). Bitsch & al.

(2011) desarrollaron el *FootPath*, un sistema de navegación que utiliza solo el acelerómetro y la brújula para localizar la ruta y aconsejar a las personas sobre las direcciones. Para compensar las imprecisiones de la detección de pasos y estimación de direcciones, se aparean los pasos detectados y las rutas esperadas usando un procedimiento de alineamiento de secuencias del campo de la bioinformática. Esta aplicación, por ejemplo, podría ser útil en espeleología. Boudell & Middleton (2019) desarrollaron el *PlotLocator*, una aplicación que permite a los investigadores de campo ubicar sus parcelas de estudio en lugares de cobertura arbórea elevada, que interfiere con las señales GPS.

El acelerómetro, usado en conjunción con el giroscopio y el magnetómetro, permite identificar actividades físicas y miden las proporciones de tiempo inmóvil y en movimiento (Figura 5). Se han desarrollado numerosas aplicaciones



**Fig. 5.** Datos primarios emitidos por los sensores micro-electromecánicos dentro de un teléfono, en el bolsillo de una persona mayor al subir una escalera. El acelerómetro, giroscopio y magnetómetro producen señales continuas en dirección de tres ejes ortogonales X (azul), Y (rojo) y Z (verde) y el barómetro produce una medición cada varios milisegundos. (Modificada de Ma & al. 2013).

**Fig. 5.** Raw data of smartphone micro-electromechanical sensors located in a pocket of an old person while walking up a stair (A). Accelerometer, gyroscope and magnetometer produce continuous signals in three orthogonal axes: X (blue), Y (red) and Z (green) and barometer produce a signal per several milliseconds. (Modified from Ma & al. 2013).



que, a partir de las señales de estos sensores, detectan los pasos (podómetros), movimientos y vibraciones, e incluso para detectar actividad sísmica. Ma & al. (2013) evaluaron los sensores del *Google Nexus 4* (acelerómetro, giroscopio, magnetómetro y GPS) a diferentes frecuencias de muestreo. Sus resultados apuntan a que el acelerómetro y giroscopio de este modelo son muy estables, con desviaciones solo de 0,1-0,8 unidades con la realidad, mientras que la brújula tiene una mayor desviación (3 grados) y el GPS determina la ubicación con una desviación inferior a 10 metros.

Los barómetros son sensores de reciente incorporación a los teléfonos, fundamentalmente para complementar los servicios de ubicación en entornos libres de señales GNSS. Estos sensores de presión atmosférica utilizan dicha variable para inferir la altitud sobre el nivel del mar, con alta precisión (de hasta 1 m) (Masoud & al. 2019). Por su sensibilidad se ha demostrado que puede detectar eventos de apertura y cierre de puertas dentro de construcciones (Wu & al. 2015), el piso de un edificio donde se encuentra el usuario (Ye & al. 2016) y puede ser usado para predicciones climáticas.

La tendencia actual permite prever un incremento rápido en la cantidad y calidad de los sensores integrados a los celulares. Por ejemplo, los modelos de *iPhone* o los *Pixel 4* más avanzados ya sustituyeron los sensores de huellas digitales por sistemas de reconocimiento facial que si bien en los modelos más antiguos utilizaban la cámara fotográfica, estos contienen sensores infrarrojos que mapean el rostro en tres dimensiones. Los modelos *Pixel 4* y *Pixel 4 XL* ya han incorporado un sensor *solí* que es, en esencia, un módulo de radar para detectar movimientos en la vecindad del teléfono e identificar gestos. Este sensor emite una señal de FM de 60 GHz, recibe los rebotes en las superficies sólidas y por medio del efecto Doppler identifica dirección y velocidad de los movimientos con precisiones milimétricas (Lien & al. 2016). La compañía Apple adicionó al *iPad Pros* un LiDAR (*Light Detection And Ranging*), tecnología de escáner con láser que mide profundidad y distancia con alta precisión y permite reconstruir entornos tridimensionales (Nield 2020) y que hasta ahora se había restringido a plataformas aéreas o satelitales de exploración de la superficie de la tierra. Todos estos nuevos sistemas aún están en desarrollo pero la cantidad de aplicaciones alternativas potenciales ya se comienza a entrever.

### Ejemplos de investigaciones biológicas que han utilizado los sensores de los teléfonos celulares

El número de investigaciones realizadas que han empleado celulares y sus sensores es muy elevado (Teacher & al. 2013), a pesar de que en estudios biológicos no llega a las expectativas esperables por sus potenciales. Hay antecedentes de estudios que han empleado aplicaciones de celulares para evaluaciones de hábitat a partir de fotos aéreas (Getzin & al. 2012), o para el seguimiento de micro poblaciones controladas (Pennekamp & Schtickzelle 2013). La tecnología móvil también se ha usado para la medición de la presión atmosférica (Mass & Madaus 2014) y la temperatura ambiental (Overeem & al. 2013).

Una de las líneas de mayor desarrollo relacionadas al uso de los sensores de los teléfonos en biología se asocia a la identificación de especies. El empleo de imágenes digitales para la identificación de insectos es práctica común en centros de bioseguridad (por ejemplo: Disbury & al. 2008) y en algunos grupos, como los mosquitos, puede ser de alta precisión (Braz-Sousa & al. 2019). En consecuencia, en varios países se han desarrollado proyectos de monitoreo de estos vectores a través de aplicaciones de celulares (ciencia ciudadana). Por ejemplo, el programa "*Mosquito Alert*", en España (Palmer & al. 2017), el programa '*Muekenatlas*' (en Alemania) (Walther & Kampen 2017), el programa *Great Arizona Mosquito Hunt* (USA) (Tarter & al. 2019), el '*Zika Mozzie Seeker*' (en Australia) (Montgomery & al. 2017). Este tipo de trabajo ha sido llamado entomología urbana (Williams & al. 2017) o *e-entomology* (Braz-Sousa & al. 2019).

Existe una extensa literatura sobre *Automated Taxon Identification (ATI) Systems* (Chesmore 2007) que también emplea para ello los sonidos en grupos como las aves y algunos insectos (Stowell & Plumbley 2014). El trabajo de Zilli & al. (2014) se enfoca en la detección de una cícada amenazada a partir de clasificadores automatizados basados en el canto e implementados en una aplicación enfocada a ciencia ciudadana llamada *Cicada Hunt*. El potencial para la identificación automatizada a partir de los cantos fue identificado por Chesmore (2004), quien propuso el sistema IBIS (*Intelligent Bioacoustic Signal Identification System*) para reconocer ortópteros británicos. Dos aplicaciones de celulares han tenido un reconocimiento internacional por sus resultados en relación al estudio de las especies invasoras en Europa: *RINSE That's Invasive!* y *KORINA* (Adriaens & al. 2015). Baumbach & al. (2019) recopilaron a través de una aplicación de celulares los avistamientos de *Eretmochelys imbricata* (tortuga carey) para calcular sus áreas de movimiento en un área protegida en Roatán, Honduras, mediante el uso de una aplicación de *smartphone*.

Hay que señalar que el empleo de teléfonos inteligentes en investigaciones biológicas es mucho más amplio de lo que se recoge en este trabajo, debido a que estos instrumentos son centrales en el desarrollo actual de la ciencia ciudadana (Wess 2017, Andrachuk & al. 2019). Sin embargo, la mayoría de estos estudios se apoyan en la comunicación y recogida masiva de información y no tanto en los sensores internos de los equipos. Estos, sin embargo, son centrales en el desarrollo de la nueva generación de internet: la llamada Internet de Todas las Cosas (*Internet of Every Things*, IoE).

### Desventajas y problemas asociados al uso de celulares inteligentes en investigaciones científicas

A pesar de todas las potencialidades, el empleo de celulares inteligentes en trabajos científicos también tiene varias desventajas significativas asociadas, más allá de la calidad técnica de los equipos. Aunque es positivo que existan solo dos sistemas operativos (*iOS* y *Android*), el primero es cerrado y limitado para la creación de nuevas aplicaciones. El sistema *Android*, por otra parte, se ejecuta en muchos dispositivos móviles de

TABLA I

**Ejemplo de los sensores más comunes en los teléfonos celulares, sus funciones propias en los equipos y ejemplos de usos potenciales en investigaciones científicas biológicas.**

TABLE I

**Common sensors in smartphones, its function in the equipment and examples of potential uses in biological scientific research.**

Sensores	Función en el equipo	Ejemplos de usos potenciales
Cámaras digitales	Toma de fotografías y realizar video-llamadas	Documentación de observaciones de campo Monitoreo o evaluación de cambios fenológicos o estacionales Evaluación de coberturas de follaje o de superficies de parcelas Cámaras trampa (activadas por detección de movimiento, vibraciones o sonidos) Lupas, microscopios o telescopios de campo Estudios de coloración animal y vegetal Detectores de movimiento y video-seguimiento en estudios conductuales Lectores de códigos de barras o QR Identificación automatizada
Fotómetros	Ajusta el brillo de la pantalla a la iluminación ambiental	Medición de la intensidad luminosa en distintos hábitats Control de la iluminación en experimentos de cultivo Estudios de fenómenos relacionados con la luz (fotocinesis, fototropismo, fototaxismo) Estudios de fotoperiodicidad Monitoreo de cambios fenológicos Estudios de variación clinal en iluminación Correlación de respuestas conductuales con la luz
Micrófonos	Registra el audio para las llamadas	Caracterización del ambiente acústico Libretas de campo o registro de datos a manos libres Identificadores de sonidos Estudios de bioacústica Estudios conductuales Identificación automatizada
Receptores GPS/GNSS	Obtiene la ubicación del equipo por vía satelital, para los servicios basados en localización	Geo-referenciación de individuos, registros, unidades de muestreo, fotografías, notas de campo Medición de desplazamientos Delimitación y medición de parcelas irregulares grandes Como altímetros: para la caracterización de localidades de estudio
Acelerómetros	Mide los movimientos del equipo en tres direcciones	Estudios de movimientos, detectores de respuestas conductuales Estudios sociales
Giroscopios	Identifica los cambios de posición del instrumento y cambios sobre sus ejes	Estudios de movilidad anatómica Mediciones de reacciones físicas Seguimiento en estudios conductuales en cautiverio
Sensores de magnetismo	Identifica las orientaciones del instrumento	Detectores de metales Como brújula Orientación de objetos Estudios de desplazamiento Ubicación de parcelas de estudio
Sensor de proximidad	Identifica cuando el teléfono está cerca del rostro para apagar el monitor	Medición de distancias cortas Registros de aproximaciones
Barómetros	Registra la altitud a través de la presión atmosférica.	Mediciones de presión atmosférica Caracterización de microclimas Como altímetro
Termómetros, sensores de humedad	Registra las condiciones del equipo para activar sistemas de protección	Control de condiciones experimentales o de almacenamiento Caracterización de hábitats o microclimas
Escáneres de huellas digitales o de iris	Sistema biométrico de protección de datos y como vía de acceso al dispositivo.	Identificación de individuos de estudio Diseño de experimentos fisiológicos o biomédicos a ciegas
Receptor de bluetooth y Wi-Fi	Permite el intercambio de datos entre equipos	Recolecta o recopilación de información Transmisión de datos de los demás sensores a una computadora Conexión con otros equipos de investigación Sincronización de bases de datos y registros entre investigadores

diferentes marcas, modelos y especificaciones, por lo que asegurar que las aplicaciones desarrolladas puedan ejecutarse bien en cualquier teléfono puede ser problemático y consumir tiempo. No todos los sensores están presentes en todos los modelos de celulares, sino que existe una alta diversidad. Las aplicaciones deben ser descargadas, instaladas y configuradas manualmente para cada dispositivo, con lo cual la participación humana puede ser fuente de demoras o errores.

A pesar del desarrollo creciente de las capacidades de cómputo de estos equipos, aún los teléfonos celulares no pueden enfrentar algoritmos de manejo de datos o aprendizaje de máquina muy potentes o de altos volúmenes de datos como, por ejemplo, el análisis de sonidos (D'Hondt & al. 2013) que en la mayoría de los casos debe hacerse con cómputo en la nube. Muchas aplicaciones requieren inferencias en tiempo real que solo pueden realizarse a través del empleo de cómputos en la nube, pero para esto se requiere de una conexión estable a internet. En muchos lugares alejados, en el campo o en el mar, no se espera que exista conectividad y por ello, idealmente las aplicaciones utilizadas deberían funcionar incluso fuera del rango de recepción de señales. El muestreo frecuente de los sensores puede consumir la energía del celular rápidamente (por ejemplo, el uso continuo del GPS).

Por supuesto, como mismo sucede con cualquier instrumento de medición para un trabajo científico, antes de emplear cualquier sensor integrado a un celular hay que evaluar la exactitud, precisión y disponibilidad que poseen a través de una calibración previa. En el caso de emplearse sensores internos, debe tenerse en cuenta que existe una variabilidad implícita en estos instrumentos de medida y que esta se suma a la de las propias variables que se toman, lo que hace que una sola medida puntual no sea suficiente para asegurar la exactitud de los resultados y por ello se deben emplear los promedios de varias medidas en el mismo sitio.

También en muchos casos hay que identificar o desarrollar las aplicaciones necesarias para recopilar y extraer los datos de los sensores, lo cual puede ser problemático o incluso consumir mucho tiempo. Téngase en cuenta que, en 2019, *Google Play* (la plataforma de Android) contenía cerca de 2,5 millones de aplicaciones y la *App Store* (de iOS) contenía 1,8 millones (más del 90 % gratuitas, en ambos casos), por lo que encontrar las aplicaciones más eficientes es una tarea difícil y trabajosa.

Por otra parte, los investigadores típicos en Biología no poseen los conocimientos o habilidades que se requieren para la programación de aplicaciones especializadas en estos dispositivos. Y los programadores pueden no poseer el conocimiento científico-técnico para crear dichas aplicaciones, ni conocimientos de ingeniería para crear dispositivos externos con propósitos investigativos, por lo que la colaboración interdisciplinaria es una necesidad real (Ken-En 2015). También, la ausencia de reconocimiento académico del uso de estos instrumentos y las aún limitantes capacidades de cómputo y memoria dificultan las contribuciones científicas de los

teléfonos celulares. Una ventaja es que el sistema *Android*, al ser una plataforma abierta, brinda posibilidades a los desarrolladores de software para acceder libremente a todos los aspectos de la funcionalidad del equipo, siendo más amigable para la producción de nuevas aplicaciones (en comparación con *iOS*), y con pocas barreras para implementarlas e instalarlas. Sin embargo, existen experiencias donde estudiantes de pregrado con poca preparación como programadores son capaces de desarrollar aplicaciones (Lane & al. 2010).

Una limitación colateral pudiera ser el pequeño tamaño de las pantallas que limita la cantidad de información que se presenta y puede ser molesto para personas mayores o con dificultades visuales. Y existen también marcadas diferencias generacionales en el dominio de estos métodos, dado que las personas de mayor edad, de manera general, están menos familiarizadas con la tecnología móvil. Sin embargo, tal vez uno de los peores problemas es el mal uso potencial. Emplear los celulares y sus sensores es relativamente simple y se brinda para que las personas tiendan a usarlos en mediciones para las que no tienen la calidad o sensibilidad suficiente (por ejemplo, utilizar el GPS para mediciones de distancias cortas). Es muy importante aparear la técnica apropiada con los problemas específicos a resolver (Connors & al. 2012, Teacher & al. 2013, McKinley & al. 2017). Esto se asocia también al excesivo número de aplicaciones existentes y a que no todas funcionan con la calidad necesaria para usos científicos. Por muy bueno que sea un sensor, la calidad de la información va a depender en gran medida de la aplicación que se utilice para extraer y procesar sus datos. Es una tentación fuerte comenzar a emplear las aplicaciones sin estandarizaciones o validaciones previas de cada equipo a emplear, con un diseño apropiado para ello.

Otras razones se han esgrimido para excluir a los teléfonos celulares de los trabajos de laboratorio. Las principales han estado asociadas a la distracción que causan, la posible interferencia con otros equipos electrónicos, la posibilidad de generar fuego ante gases inflamables o el hecho de que son fuente de contaminación biológica. Los problemas de bioseguridad se incrementan si los investigadores tienen que quitarse los guantes para operarlos. Sin embargo, salvo excepciones, en muchos casos las ventajas sobrepasan los riesgos potenciales.

Finalmente, no puede negarse la existencia y efecto de la llamada "brecha tecnológica" sobre todo en países de economías menores (Weiss & al. 2015). Las desigualdades persisten en la facilidad de acceso y uso de internet, en la disponibilidad y calidad de las nuevas tecnologías y servicios de comunicación, en conectividad en zonas rurales o remotas, así como en barreras educativas y de alfabetización informática (Graham 2011, Haklay 2013, Weiss & al. 2015). Estos conjuntos de limitaciones de tipo económico, racial, político y geográfico son llamados barreras o divisiones digitales (*digital divides*) (Dewan & Riggins 2005, Sui & al. 2013, Weiss & al. 2015), y pueden afectar sobre todo a los sectores de la población con menos ingresos y limitarlos en el acceso

a celulares de calidad adecuada para trabajos científicos. A pesar de ello, la penetración social de los teléfonos celulares continúa teniendo un crecimiento exponencial a nivel global y los equipos y servicios de acceso a internet se hacen cada vez más económicos.

### CONSIDERACIONES FINALES

Los beneficios potenciales de las aplicaciones de celulares se pueden resumir en 1) su amplio alcance geográfico, 2) el incremento en eficiencia - menos tiempo de obtención, 3) datos más precisos y de más calidad, al evitarse errores humanos de transcripción, 4) mayor seguridad en la conservación de los datos, 5) la universalidad de los modelos de equipos estándares entre regiones y, 6) una amplia variedad de sensores integrados utilizables, muchos de los cuales no dependen de conexión a torres de señal telefónica o internet.

El empleo de sensores móviles asociados a los teléfonos inteligentes aún está en una etapa que puede ser considerada como temprana, y excepto en algunas ramas científicas, aún no se utilizan con la frecuencia que pudiera esperarse dadas sus ventajas. Sin embargo, se está en un momento apasionante para la incorporación de las nuevas tecnologías emergentes en las investigaciones de campo, sin necesidad de grandes inversiones, con el objetivo de lograr resultados innovadores e impactantes. Los teléfonos celulares, que tan intempestivamente han irrumpido la vida diaria, tienen potencialidades para ir más allá y convertirse en importantes herramientas de trabajo científico. Aprender a hacer un uso más eficiente de estas herramientas puede revolucionar la manera en que los investigadores trabajan.

De forma general, cualquier método que conlleve a hacer más eficiente la toma de datos, su conservación, transmisión y manejo puede redundar en un avance importante en la calidad de las investigaciones. Esto se incrementa si está asociado a la conectividad entre fuentes de información en tiempo real a través de internet. Las capacidades de los servicios de la nube (*on-cloud computing*) dan posibilidades sin precedentes para la adquisición de datos a gran escala y formas de validaciones científicas antes inexploradas, como las que posibilita la retroalimentación pública de los resultados de análisis de *Big Data*.

Es real e innegable que los equipos especializados comerciales para la toma de datos científicos (equipos dedicados) pueden tener, en su mayoría, mayor precisión y confiabilidad en los servicios que ofertan. No puede esperarse la misma calidad en los datos de los sensores de los teléfonos inteligentes, diseñados con otros objetivos. Sin embargo, de acuerdo con protocolos apropiados de validación y la selección cuidadosa de las aplicaciones para la toma de datos, estos sensores pueden ser alternativas razonables, de calidad suficiente para muchos trabajos de campo que no requieren de precisiones demasiado altas. Además, pudieran ser empleados por investigadores y proyectos que no cuenten con un soporte económico para sobrellevar los grandes gastos que implica la tecnología ideal.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradecen los comentarios y aportes de los revisores anónimos y los editores de la Revista del Jardín Botánico Nacional que sirvieron para el mejoramiento del trabajo.

### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

D. Denis concibió la idea original y escribió un primer manuscrito. Todos los autores condujeron la búsqueda y revisión de la literatura, aportaron contenidos y revisaron la versión final.

### CUMPLIMIENTO DE NORMAS ÉTICAS

*Conflicto de intereses:* Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

*Consentimiento para la publicación:* Los autores han dado su consentimiento para publicar este trabajo.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aanensen, D.M., Huntley, D.M., Feil, E.J., al-Own, F. & Spratt, B.G. 2009. EpiCollect: linking smartphones to web applications for epidemiology, ecology and community data collection. *PLoS ONE* 4: e6968.

Adams, A.M., Jantzen, M.K., Hamilton, R.M. & Fenton, M.B. 2012. Do you hear what I hear? Implications of detector selection for acoustic monitoring of bats. *Methods Ecol. Evol.* 3: 992-998.

Adriaens, T., Sutton-Croft, M., Owen, K., Brosens, D., Van Valkenburg, J., Kilbey, D., Groom, Q., Ehmgig, C., Thürkow, F., Van Hende, P. & Schneider, K. 2015. Trying to engage the crowd in recording invasive alien species in Europe: Experiences from two smartphone applications in northwest Europe. *Mgmt. Biol. Invas.* 6: 215-225.

Afzal, M.H., Renaudin, V., Lachapelle, G. 2011. Use of earth's magnetic field for mitigating gyroscope errors regardless of magnetic perturbation. *Sensors* 11: 11390-11414.

ANSI. 1983. S1.4-1983 (r2006/ansi s1.4a-1985 (r2006). American National Standard Specification for Sound Level Meters. *American National Standards Institute*. New York.

Andrachuk, M., Marschke, M., Hings, C. & Armitage, D. 2019. Smartphone technologies supporting community-based environmental monitoring and implementation: a systematic scoping review. *Biol. Cons.* 237: 430-442.

Aranki, D., Kurillo, G., Yan, P.S., Liebovitz, D.M. & Bajcsy, R. 2016. Real-time monitoring of patients with chronic heart-failure using a smartphone: Lessons learned. *IEEE Trans. Affect. Comput.* 7: 206-219.

Bauer, C. 2013. On the (in-) accuracy of GPS measures of smartphones: a study of running tracking applications. *Proc. Int. Conf. Adv. Mobile Comp. Multimedia*. Diciembre 2013, Vienna, Austria. Pp: 335-341.

Baumbach, D.S., Anger, E.C., Collado, N.A. & Dunbar, S.G. 2019. Identifying Sea Turtle Home Ranges Utilizing Citizen-Science Data from Novel Web-Based and Smartphone GIS Applications. *Chelonian Cons. Biol.* 18(2): 133-144.

Bitsch, J., Smith, P., Viol, N. & Wehrle, K. 2011. FootPath: Accurate Map-based Indoor Navigation Using Smartphones. *IEEE* 978-1-4577-1804-5/11.

Bolger, D.T., Morrison, T.A., Vance, B., Lee, D. & Farid, H. 2012. A computer-assisted system for photographic mark-recapture analysis. *Methods Ecol. Evol.* 3: 813-822.

Bonney, R., Cooper, C.B. & Dickinson, J. 2009. Citizen science: a developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. *BioScience* 59: 977-84.

- Boudell, J. A., & Middleton, B. A. 2019. Plot Locator: An app for locating plots in the field. *Applications in plant sciences*. 7(12): e11311.
- Braz-Sousa, L., Fricker, S.R., Doherty, S.S., Webb, C.E., Baldock, K.L. & Williams, C.R. 2019. Citizen science and smartphone e-entomology enables low-cost upscaling of mosquito surveillance. *Sci. Total Env.* 704: 135349. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135349>
- Chesmore, D. 2004. Automated bioacoustic identification of species. *An. Acad. Brasil. Ciên.* 76(2): 436-440.
- Chesmore, D. 2007. The Automated Identification of Taxa: Concepts and Applications. Cap. 6, pp: 83-100. En: MacLeod, N. (Ed.) Automated Taxon Identification in Systematics: Theory, Approaches and Applications, CRC Press. New York.
- Connors, J.P., Lei, S. & Kelly, M. 2012. Citizen science in the age of neogeography: utilizing volunteered geographic information for environmental monitoring. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 102 (6): 1267-1289.
- Conrad, C.C., & Hilchey, K.G. 2011. A review of citizen science and community-based environmental monitoring: issues and opportunities. *Environ. Monit. Assess.* 176: 273-291.
- D'Hondt, E., Stevens, M. & Jacobs, A. 2013. Participatory noise mapping works! An evaluation of participatory sensing as an alternative to standard techniques for environmental monitoring. *Perv. Mobile Comp.* 9: 681-694.
- Dabove, P., Ghinamo, G. & Lingua, A. M. 2015. Inertial sensors for smartphones navigation. *SpringerPlus* 4: 834. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1572-8>
- Damani, H., Mehta, R. & Katre, N. 2018. Convergence of Internet of things, Cloud Computing, Big Data and Security. *Int. J. Comp. Appl.* 181(4): 43-47.
- Das, R.D. & Winter, S. 2018. A fuzzy logic based transport mode detection framework in urban environment. *J. Intelligent Trans. Syst.* 22: 478-489.
- Denis, D. & Cruz-Flores, D. 2020. ¿Podemos confiar en el GPS de los celulares para estudios de campo? Preprint. <https://doi.org/10.13140/rq.2.2.33389.4147>
- Dewan, S., & Riggins, F.J. 2005. The digital divide: Current and future research directions. *Journal of the Association for information systems*. 6(12): 298-337.
- Dey, S., Sahoo, S., Agrawal, H., Mondal, A., Bhowmik, T. & Tiwari, V. 2017. Personalized Cumulative UV Tracking on Mobiles & Wearables. En: *Proceedings of the 39th Annual International Conference of the IEEE, Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. IEEE Xplore, Seogwipo, South Korea.
- Disbury, M., Cane, R.P. & Russell, R.C. 2008. Remote identification of exotic mosquito specimens using digital photography. *Austr. J. Entom.* 47(2): 128-130.
- Ericsson. 2013. Ericsson Mobility Report. Disponible en: <http://www.eric.com/mobility-report>. Último acceso: Marzo, 2020.
- Fligor, B. J. 2010. iPhone sound level meter app. Disponible en: <http://www.audiologyonline.com/ask-the-experts/iphone-sound-level-meter-apps-150>. Último acceso: Julio, 2020.
- Galster, J.A. 2013. 15 mobile apps to understand, prevent, measure and manage hearing loss Audiol. Pract. 4: 16-19. Disponible en: [http://www.hearing.health.mil/aboutus/pressroom/featured\\_content/13-01-30/15\\_Mobile\\_Apps\\_to\\_Understand\\_Prevent\\_Measure\\_and\\_Manage\\_Hearing\\_Loss.aspx](http://www.hearing.health.mil/aboutus/pressroom/featured_content/13-01-30/15_Mobile_Apps_to_Understand_Prevent_Measure_and_Manage_Hearing_Loss.aspx). Último acceso: Febrero, 2020.
- Garnweidner-Holme, L.M., Borgen, I., Garitano, I., Noll, J. & Lukasse, M. 2015. Designing and developing a mobile smartphone application for women with gestational diabetes mellitus followed-up at diabetes outpatient clinics in Norway. *Healthcare* 3: 310-323
- Garrido, A., Bertolelli, L., Hoefler, A., Yebra, M. & Munasinghe, K. 2019. The FrogPhone: A novel device for real-time frog call monitoring. *Methods Ecol. Evol.* 00: 1-7.
- Getzin, S., Wiegand, K. & Scheuning, I. 2012. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. *Methods Ecol. Evol.* 3: 397-404.
- Gou, T., Hua, J., Wua, W., Ding, X., Zhoua, S., Fanga, W. & Mu, Y. 2018. Smartphone-based mobile digital PCR device for DNA quantitative analysis with high accuracy. *Biosensors and Bioelectronics* 120: 144-152.
- Graham, M. 2011. Time machines and virtual portals: The spatialities of the digital divide. *Progress in development studies*. 11(3): 211-227.
- Gurgel-Gonçalves, R., Komp, E., Campbell, L.P., Khalighifar, A., Mellenbruch, J., Mendonça, V.J. 2017. Automated identification of insect vectors of Chagas disease in Brazil and Mexico: the virtual vector lab. *PeerJ*. 5: e3040.
- Haklay, M. 2013. Neogeography and the delusion of democratisation. *Environment and Planning A*. 45(1): 55-69.
- Harari, G.M., Lane, N.D., Wang, R., Crosier, B.S., Campbell, A.T. & Gosling, S. D. 2016. Using smartphones to collect behavioral data in psychological science: opportunities, practical considerations and challenges. *Perspectives on Psychological Science* 11(6): 838-854.
- Hellesund, S. 2019. Measuring the speed of sound in air using a smartphone and a cardboard tube. *Physics Education* 54(3): 035015.
- Hiby, L., Paterson, W.D., Redman, P., Watkins, J., Twiss, S.D. & Pomeroy, P. 2013. Analysis of photo-ID data allowing for missed matches and individuals identified from opposite sides. *Methods Ecol. Evol.* 4: 252-259.
- Honicky R., Brewer, E.A., Paulos, E., White, R. 2008. N-Smarts: Networked Suite of Mobile Atmospheric Real-Time Sensors. *Proc. 2nd ACM SIGCOMM NSDR*, pp.: 25-30. <https://doi.org/10.1145/1397705.1397713>
- Ibekwe T.S., Folorunsho, D.O., Dahilo, E.A., Gbujie, I.O., Nwegbu, M.M. & Nwaorgu, O.G. 2016. Evaluation of mobile smartphones app as a screening tool for environmental noise monitoring. *J. Occup. Environ. Hyg.* 13(2): D31-D36. <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1093134>
- Igoe, D., Parisi, A.V. & Carter, B. 2013. Characterization of a smartphone camera's response to ultraviolet A radiation. *Photochem. Photobiol.* 89(1): 215-218.
- Iliffe, M., Mwinami, T. & Harper, D. 2011. Counting flamingos with a mobile phone - connecting all the flamingo lakes? *Bull. Flamingo Spec. Group*, 18: 38-41.
- Jonas-Dwyer, D. & Pospisil, R. 2004. The millennial effect: implications for academic development. pp: 194-206. En: Transforming knowledge into wisdom: holistic approaches to teaching and learning. *Proceedings of the 27th HERDSA Annual Conference*, Miri, Sarawak.
- Kanjo, E. 2010. NoiseSPY: a real-time mobile phone platform for urban noise monitoring and mapping, *Mobile Netw. Appl.* 15: 562-574.
- Kardous, C.A. & Shaw, P. 2014. Evaluation of smartphone sound measurement applications. *J. Acoust. Soc. Am. Express Lett.* 135: EL186-92.

- Khan, W.Z., Xiang, Y., Aalsalem, M.Y. & Arshad, Q. 2013. Mobile Phone Sensing Systems: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 15(1): 402-427.
- Ken-En, S. 2015. Use of smartphone apps for biomedical research. *BioSpectrum*. Disponible en: [http://www.biospectrumasia.com/print\\_article/biospectrum/opinion/2205](http://www.biospectrumasia.com/print_article/biospectrum/opinion/2205). Último acceso: Septiembre, 2020.
- Kim, J.H., Joo, H.G., Kim, T.H. & Ju, Y.G. 2015. A smartphone-based fluorescence microscope utilizing an external phone camera lens module. *BioChip J.* 9: 285-292.
- Kumar, R., Chou, C.T., Kanhere, S.S., Bulusu, N. & Hu, W. 2010. Ear-phone: an end-to-end participatory urban noise mapping system. pp. 105-116. En: Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Abril 12-16, 2010, Stockholm, Sweden. New York, NY, USA.
- Kumar, P., Murthy, V., Neela, P.K., Prasad, S. & Keesara, S. 2016. A smartphone app for cephalometric analysis. *J. Clinic. Orthod.* L(11): 694-699.
- Kwok, R. 2009. Personal technology: Phoning in data. *Nature* 458: 959-961.
- Lane, N.D., Miluzzo, E., Lu, H., Peebles, D., Choudhury, T. & Campbell, A.T. 2010. A survey of mobile phone sensing. *IEEE Comm. Magazine* 140-150.
- Lien, J., Gillian, N., Karagozler, M.E., Amihoud, P., Schwesig, C., Olson, E., Raja, H. & Poupyrev, I. 2016. Soli: Ubiquitous gesture sensing with millimeter wave radar. *ACM Transaction on Graphics (TOG)* 35(4): 1-19.
- Lu, H., Pan, W., Lane, N.D., Chaoudhury, T. & Campbell, A.T. 2009. Sound-Sense: Scalable Sound Sensing for People-Centric Applications on Mobile Phones. *Proc. 7th ACM MobiSys*, pp.: 165-178.
- Lue, G. & Miller, E.J. 2019. Estimating a Toronto pedestrian route choice mode using smartphone GPS data. *Travel Behav. Soc.* 14: 34-42.
- Ma, Z., Qiao, Y., Lee, B. & Fallon, E. 2013. Experimental evaluation of mobile phone sensors. *ISSC 2013, LYIT Letterkenny*, pp.: 20-21.
- Masoud, M., Jaradat, Y., Manasrah, A. & Jannoud, I. 2019. Sensors of smart devices in the internet of everything (ioe) era: big opportunities and massive doubts. *Hindawi J. Sens.* 2019: 26 p. Article ID 6514520. <https://doi.org/10.1155/2019/6514520>
- Maisonneuve, N, Stevens, M. & Ochab, B. 2010. Participatory noise pollution monitoring using mobile phones. *Information Polity* 15: 51-71.
- Mass, C.F. & Madaus, L.E. 2014. Surface pressure observations from smartphones: A potential revolution for high-resolution weather prediction? *Bull. Am. Meteorol. Soc.* <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00188.1>.
- Mauk, M., Song, J., Bau, H.H., Gross, R., Bushman, F.D., Collman, R.G. & Liu, C. 2017. Miniaturized devices for point of care molecular detection of HIV. *Lab Chip* 17(3): 382-394.
- McKinley, D.C., Miller-Rushing, A.J., Ballard, H.L., Bonney, R., Brown, H., Cook-Patton, S.C., Evans, D.M., French, R.A., Parrish, J., Phillips, T.B., Ryan, S.F., Shanley, L.A., Shirk, J.L., Stepenuck, K.F., Weltzin, J.F., Wiggins, A., Boyle, O.D., Briggs, R.D., Chapin III, S.F., Hewitt, D.A., Preuss, P.W. & Soukup, M.A. 2017. Citizen science can improve conservation science, natural resource management, and environmental protection. *Biol. Conserv.* 208: 15-28.
- Mendes, J., Pinho, T.M., Neves dos Santos, F., Sousa, J.J., Peres, E., Boaventura-Cunha, J., Cunha, M. & Morais, R. 2020. Smartphone applications targeting precision agriculture practices—a systematic review. *Agronomy*. 10(6): 855.
- Mennill, D.J., Battiston, M., Wilson, D.R., Foote, J.R. & Doucet, S.M. 2012. Field test of an affordable, portable, wireless microphone array for spatial monitoring of animal ecology and behaviour. *Methods Ecol. Evol.* 3: 704-712.
- Monteiro, M. & Martí, A.C. 2020. Using smartphones as hydrophones: two experiments in underwater acoustics. [Physics.ed-ph]. ArXiv: 2002.04382v2
- Montgomery, B.L., Shivas, M.A., Hall-Mendelin, S., Edwards, J., Hamilton, N.A., Jansen, C.C., McMahon, J.L., Warrilow, D. & van den Hurk, A.F. 2017. Rapid Surveillance for Vector Presence (RSVP): Development of a novel system for detecting *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*. *PLoS Neglected Trop. Diseases* 11(3), p.e0005505.
- Nature America, Inc. 2010. The scientist and the smartphone. Editorial. *Nature methods* 7(2): 87.
- Newman, G., Wiggins, A., Crall, A., Graham, E., Newman, S. & Crowston, K. 2012. The future of citizen science: emerging technologies and shifting paradigms. *Front. Ecol. Environ.* 10(6): 298-304.
- Nield, D. 2020. All the Sensors in Your Smartphone, and How They Work. En: <https://gizmodo.com/all-the-sensors-in-your-smartphone-and-how-they-work-1797121002>. Último acceso: Septiembre, 2020.
- Niu, X., Wang, Q., Li, Y., Li, Q. & Liu, J. 2015. Using inertial sensors in smartphones for curriculum experiments of inertial navigation technology. *Educ. Sci.* 5(1): 26-46.
- Nour, A., Hellinga, B. & Casello, J. 2016. Classification of automobile and transit trips from smartphone data: Enhancing accuracy using spatial statistics and GIS. *J. Transp. Geogr.* 51: 36-44.
- Nusser, S.M., Miller, L.L., Clarke, K. & Goodchild, M.F. 2001. Future Views of Field Data Collection in Statistical Surveys. *Proc. Digital Gov. Dot Org 2001*, National Conference on Digital Government Research, Los Angeles, EU.
- Obuchi, S.P., Tsuchiya, S. & Kawai, H. 2018. Test-retest reliability of daily life gait speed as measured by smartphone global positioning systems. *Gait Posture* 61: 282-286.
- Ologe, F.E., Akande, T. y Olajide, T. 2006. Occupational noise exposure and sensorineural hearing loss among workers of a steel rolling mill. *Eur. Arch. Otorhinolaryngol.* 263(7): 618-621.
- ONU. 2009. United Nations Human Settlements Program (UNHabitat): State of the World's Cities 2008/2009: Harmonious Cities. Nairobi, Kenya: UN-HABITAT.
- Overeem, A., Robinson, J.C.R., Leijnse, H., Steeneveld, G.J., Horn, B.K.P. & Uijlenhoet, R. 2013. Crowdsourcing urban air temperatures from smartphone battery temperatures. *Geophys. Res. Lett.* 40(15): 4081-4085.
- Palmer, J.R., Oltra, A., Collantes, F., Delgado, J.A., Lucientes, J., Delacour, S., Bengoa, M., Eritja, R. & Bartumeus, F. 2017. Citizen science provides a reliable and scalable tool to track disease-carrying mosquitoes. *Nature Comm.* 8(1): 916.
- Palumbo, M.J., Johnson, S.A., Mundim, F.M., Lau, A., Wolf, A.C., Arunachalam, S., Gonzalez, O., Ulrich, J.L., Washuta, A. & Bruna, E.M. 2012. Harnessing smartphones for ecological education, research, and outreach. *Bull. Ecol. Soc. Am. Emerging Techn.* 93(4): 390-393.
- Pennekamp, F. & Schtickzelle, N. 2013. Implementing image analysis in laboratory-based experimental systems for ecology and evolution: a hands-on guide. *Methods Ecol. Evol.* 4: 483-492.

- Piras, M., Dabove, P., Lingua, A.M. & Aicardi, I. 2014. Indoor navigation using smartphone technology: a future challenge or an actual possibility? En: *2014 Plans conference proceedings*. Pp: 1343-1352.
- Poh, M.Z., Kim, K., Goessling, A.D., Swenson, N.C. & Picard, R.W. 2009. Heartphones: Sensor Earphones and Mobile Application for Non-Obtrusive Health Monitoring. *IEEE Int. Symp. Wearable Comp.* 2009. pp. 153-154.
- Qiu, X., Ge, S., Gao, P., Li, K., Yang, S., Zhang, S., Ye, X., Xia, N. & Qian, S. 2017. A smartphone-based point-of-care diagnosis of H1N1 with microfluidic convection PCR. *Microsyst. Technol.* 23(7): 2951-2956.
- Rather, Z.A., Khuroo, A.A., Dar, A.R. & Dar, T.U.H. 2019. Smartphone-integrated field microscopy (SPFM): a low-cost and portable tool to study live biological specimens in the wild. *Plant Biosystems* <https://doi.org/10.1080/11263504.2019.1686081>
- Sans-Tresserras, J.A., Gea-Pinal, J., Gimenez, M.H., Esteve, A.R., Solbes, J. & Monsoriu, J.A. 2017. Determining the efficiency of optical sources using a smartphone's ambient light sensor. *Eur. J. Phys.* 38(2): 1-9.
- Sicard, C., Glen, C., Aubie, B., Wallace, D., Jahanshahi-Anhuhi, S., Pennings, K., Daigger, G. T., Pelton, R., Brennan, J. D. & Felipe, C. D. M. 2015. Tools for water quality monitoring and mapping using paper-based sensors and cell phones. *Water Res.* 70: 360-369.
- Smith, A.W. 1988. The World Health and Prevention of Deafness and Hearing Impairment. *Noise Health.* 1: 6-12.
- Snaddon, J., Petrokofsky, G., Jepson, P. & Willis, K. J. 2013. Biodiversity technologies: tools as change agents. *Biol. Lett.* 9: 20121029.
- Sriyanti, I., Aliyana, P., Marlina, L. & Jauhari, J. 2020. Light intensity analysis using smartphone's light sensor. En: *Young Scholar Symposium on Science Education and Environment 2019. IOP Journal of Physics: Conf. Series* 1467: 012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1467/1/012056>
- Statista, 2020. [www.statista.com](http://www.statista.com). Último acceso: Agosto, 2020.
- Stowell, D. & Plumbley, M. D. 2014. Automatic large-scale classification of bird sounds is strongly improved by unsupervised feature learning. *PeerJ* 2: e488.
- Sui, D., Goodchild, M., & Elwood, S. 2013. Volunteered geographic information, the exaflood, and the growing digital divide. En: *Crowdsourcing geographic knowledge*. pp. 1-12. Springer, Dordrecht.
- Tarter, K.D., Levy, C.E., Yaglom, H.D., Adams, L.E., Plante, L., Casal, M.G., Gouge, D.H., Rathman, R., Stokka, D., Weiss, J. & Venkat, H. 2019. Using citizen science to enhance surveillance of *Aedes aegypti* in Arizona, 2015–17. *J. Am. Mosquito Control Ass.* 35(1): 11-18.
- Teacher, A.G.F., Griffiths, D.J., Hodgson, D.J. & Inger, R. 2013. Smartphones in ecology and evolution: a guide for the app-rehensive. *Ecol. Evol.* 3(16): 5268-5278.
- Thiagarajan, A., Rabindranath, L., LaCurts, K., Madden, S., Balakrishnan, H., Toledo, S. & Eriksson, J. 2009. VTrack: accurate, energy-aware traffic delay estimation using mobile phones. *Proc. 7th ACM SenSys*, Berkeley, CA, Nov. 2009. Pp: 85-98.
- Turner, J., Igoe, D., Parisi, A.V., McGonigle, A.J., Amar, A. & Wainwright, L. 2019. A review on the ability of smartphones to detect ultraviolet (UV) radiation and their potential to be used in UV research and for public education purposes. *Sci. Total Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135873>
- Walther, D. & Kampen, H. 2017. The citizen science project 'Mueckenatlas' helps monitor the distribution and spread of invasive mosquito species in Germany. *J. Med. Entomol.* 54(6): 1790-1794.
- Wang, L.-J., Chang, Y.-C., Ge, X., Osmanson, A.T., Du, D., Lin, Y. & Lei, L. 2016. Smartphone optisensing platform using a DVD grating to detect neurotoxins. *ACS Sens.* 1: 366-373.
- Weiss, J.W., Gulati, G.J., Yates, D.J. & Yates, L.E. 2015. Mobile broadband affordability and the global digital divide, an information ethics perspective. En: *48th Hawaii International Conference on System Sciences*, Koloa, Kauai, HI. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2015.261>
- Wess, T. 2017. Smartphone citizen science: can a conservation hypothesis be tested using non specialist technology? *Herit. Sci.* 5: 35. <https://doi.org/10.1186/s40494-017-0148-z>
- Welsh, K. & France, D. 2012. Smartphones and fieldwork. *Geography* 97: 47-51.
- Williams, C.R., Hawthorn-Jackson, D., Orre-Gordon, S. & O'Sullivan, S. 2017. Some cautions in the use of citizen science: a case study of urban insect collection. *Trans. Royal Soc. South Australia* 141(1): 57-69.
- Wong, C., Yi, J. & Ken-En, S. 2016. APD Colony Counter App: using watershed algorithm for improved colony counting. *Scientific Phone Apps and Mobile Devices* (2019) 5: 5.
- Wu, M., Pathak, P.H. & Mohapatra, P. 2015. Monitoring building door events using barometer sensor in smartphones. pp. 319-323. En: *UbiComp '15, Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, Osaka, Japan.
- Yang, X., Sun, M., Wang, T., Wong, M.W. & Huang, D. 2018. A smartphone based portable analytical system for on-site quantification of hypochlorite and its scavenging capacity of antioxidants. *Sens. Actuators. B Chem.* 283: 524-531. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.11.131>
- Yavuz, A. 2015. Measuring the speed of sound in air using smartphone applications. *Physics Education* 50(3): 281.
- Ye, H., Gu, T., Tao, X. & Lu, J. 2016. Scalable floor localization using barometer on smartphone. *Wirel. Commun. Mob. Comput.* 16(16): 2571. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/wcm.2706>
- Zhou, X. & Li, D. 2018. Quantifying multi-dimensional attributes of human activities at various geographic scales based on smartphone tracking. *Int. J. Health. Geogr.* 17: 11. <https://doi.org/10.1186/s12942-018-0130-3> PMID: 29743069.
- Zilli, D., Parson, O., Merrett, G.V. & Rogers, A. 2014. A hidden markov model-based acoustic cicada detector for crowdsourced smartphone biodiversity monitoring. *J. Artif. Intell. Res.* 51: 805-827.