

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL, GPS

TECNOLOGIA DE FRONTERA
DEL PRESENTE Y DEL FUTURO

FOTO: MARGAN ZAJDOWICZ - SHUTTERSTOCK

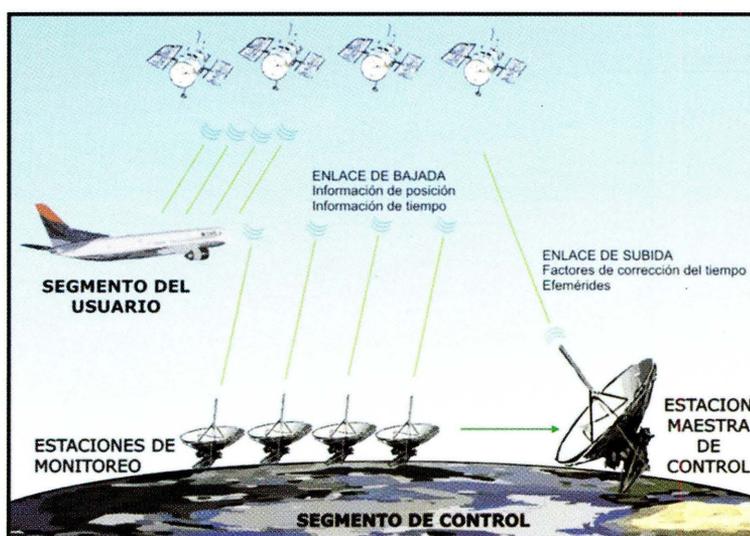
Satelite
Espacial.

En el presente artículo se describe el principio de funcionamiento del conocido Sistema de Posicionamiento Global, GPS, también referido por algunos autores como sistema de posicionamiento geográfico, y se comenta acerca de sus bondades, limitaciones y evolución tecnológica. Se mencionan algunos de los principales campos donde, el sistema GPS, ha marcado desarrollos tecnológicos. Finalmente se ilustran dónde están algunos sectores de Colombia en este escenario de tecnología internacional, cuáles son los beneficios de aprovechar a tiempo estas tecnologías espaciales antes que se tornen obsoletas y qué oportunidades afloran al participar en la instauración y evolución de estos desarrollos científicos tecnológicos.

JAIME VILLALOBOS VELASCO, Grupo de investigación ARGOS. Departamento de Física, Laboratorio de Metrología y Física Espacial. Universidad Nacional de Colombia
Key words: GPS, GNSS, SBASS, GBAS, CSTB, Ionósfera.

GENERALIDADES SOBRE INSTRUMENTOS GPS: Los instrumentos GPS se han convertido en líderes de la tecnología del presente y las perspectivas se perfilan en la dirección de afianzarse aún más en el futuro. Razones para esto son el alto grado de precisión que manejan y su capacidad de penetrar gran variedad de campos que impactan en nuestra vida cotidiana. Hace algún tiempo eran instrumentos exóticos hoy en día algunos modelos son oferta en vitrinas de sectores populares de casi cualquier ciudad. Se diseñan en gran variedad de formatos y es común confundir un receptor GPS típico con un teléfono celular.

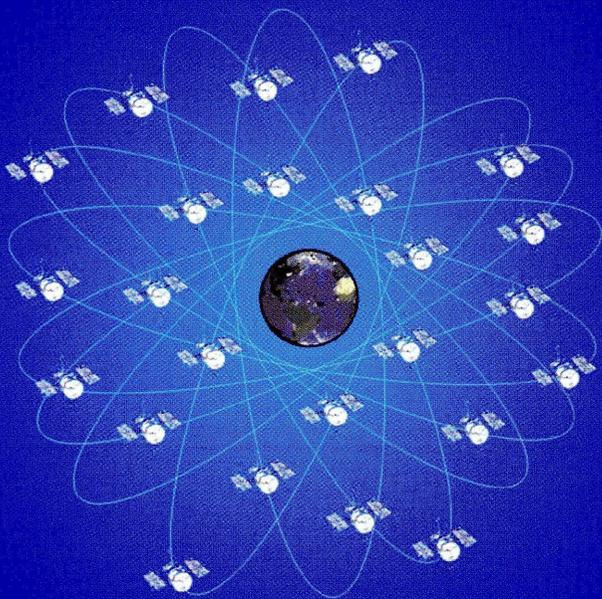
El concepto tecnológico del sistema GPS ha sido protagonista en el desarrollo de los programas espaciales de los países líderes en ciencia y tecnología. Ha desempeñado papeles notables en todas las áreas del transporte aéreo, marítimo, fluvial y terrestre. En este campo los instrumentos GPS han desplazado a la legendaria brújula a un lugar histórico y romántico. También en los amplios campos de la construcción, la ingeniería civil y la topografía los instrumentos de naturaleza GPS son de uso forzoso para demostrar competitividad. Han entrado en la aeronomía, geodesia, agricultura, la industria y la seguridad. Se han posicionado en nuestros hogares, deportes, etc. Un montañista que use una brújula toma riesgos innecesarios mientras que el que usa un GPS no enfrenta oportunidades de extraviarse siempre que tenga baterías en operación. La demanda de receptores GPS en el mercado ha sido tan grande que sus precios se han reducido desde varios miles de dólares a unos pocos miles de pesos. A principios del año 2000 un receptor GPS costaba alrededor de 15000 dólares y debía



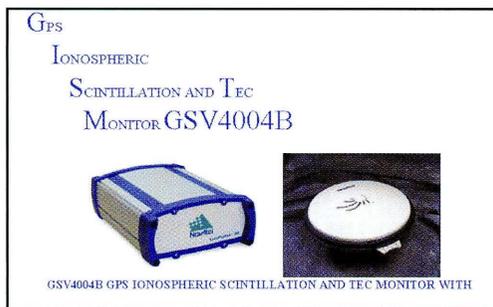
ser importado. En la actualidad a la vuelta de la esquina un receptor GPS se puede conseguir por precios en las vecindades de los 500,000 pesos. En el comercio chino hay modelos que al por mayor se ofrecen a 20 dólares la unidad. Nuestro personaje Dick Tracy fue el visionario de los celulares y la TV en la muñeca pero en la actualidad la tecnología ha superado esa ficción pues él no se imaginó el concepto de los GPS ni su amplia gama de aplicaciones.

Habiendo identificado, y desmitificado un poco estos peculiares instrumentos, se describen brevemente otros aspectos más técnicos relacionados con el principio de funcionamiento del Sistema. Lo que se conoce como GPS es realmente un sistema compuesto en tres partes ó segmentos. Un radio receptor en Tierra denominado Segmento del Usuario. Varias emisoras montadas en una constelación de satélites, denominado Segmento Espacial, que transmite señales electromagnéticas cuyos mensajes son captados simultáneamente por el

Líderes de la tecnología del presente, por el alto grado de precisión que manejan y su capacidad de penetrar gran variedad de campos que impactan en nuestra vida cotidiana.



La constelación
la componen
cerca de 30
satélites de
mediana altura.



receptor en Tierra. Finalmente la tercera parte es el Segmento de Control compuesto por una red de estaciones en Tierra. Con un poco más de detalle los tres segmentos se describen a continuación.

SEGMENTO DE CONTROL:

Esta etapa consiste de una red de estaciones rastreadoras, localizadas en varios lugares del planeta, orquestadas por un centro de control general en Boulder, Colorado, USA. La misión de estas estaciones es monitorear permanentemente la salud de cada uno de los satélites GPS. En particular, a cada satélite se le hace un seguimiento regular de su posición (efemérides) y frecuentemente según sea necesario se corrige su órbita. Otras actividades son monitorear los tiempos reportados por los relojes atómicos para corregirlos y armonizarlos a través de un procedimiento de intercomparación. Al tiempo se le hacen varias correcciones, una es la relativista pues aunque los satélites se mueven a mucho menos velocidad que la

de la luz, la corrección relativista viene a ser significativa puesto que el error se acumula con el tiempo. Otras correcciones se deben a las variaciones de los movimientos de la Tierra y a los valores de la gravedad en donde se mueven los satélites. Luego se difunde este tiempo a todos los lugares del planeta para que los relojes se sincronicen globalmente y se establezca una referencia de alta jerarquía metrológica. Así se define el tiempo. Esta sincronización es de importancia para las empresas operadoras de telefonía y radiodifusión entre otras.

SEGMENTO ESPACIAL.

Este segmento está compuesto por un grupo de satélites que constituyen la constelación satelital NAVSTAR (Estrellas Navegantes) más comúnmente conocida como GPS. Entre los instrumentos de cada satélite se encuentran un receptor para comunicarse con el Segmento de Control y un transmisor para comunicarse con los usuarios. Este sistema satelital fue construido por la Rockwell Internacional y es operado por la Fuerza Aérea Americana de Colorado Springs, el primer satélite fue puesto en órbita en 1979. La constelación la componen cerca de 30 satélites de mediana altura, alrededor de 3 radios terrestres cercanías de los 20200 km con un período de casi 12 horas alrededor de la Tierra. Normalmente 24 satélites operan permanentemente. El resto de satélites solamente están a disposición de los usuarios para cubrir la eventualidad de que algún satélite deje de operar por mantenimiento o por fallo. Los criterios y administración de estos cambios se definen del Segmento de Control. Los satélites giran en órbitas de tal manera que en cualquier punto de la Tierra siempre se puedan recibir simultáneamente señales de entre 9 y 12 satélites. Cada satélite GPS también está equipado con cuatro relojes de Cesio, que es el patrón del tiempo de más alta jerarquía metrológica. Esta clase de relojes manejan márgenes de error de uno en 1012 segundos esto significa que en 32000 años se puede atrasar ó adelantar un segundo. Con estos recursos los satélites transmiten el tiempo haciéndolo disponible, de manera permanente, en cualquier punto de la Tierra, esto se conoce como diseminación del tiempo.

SEGMENTO DEL USUARIO:

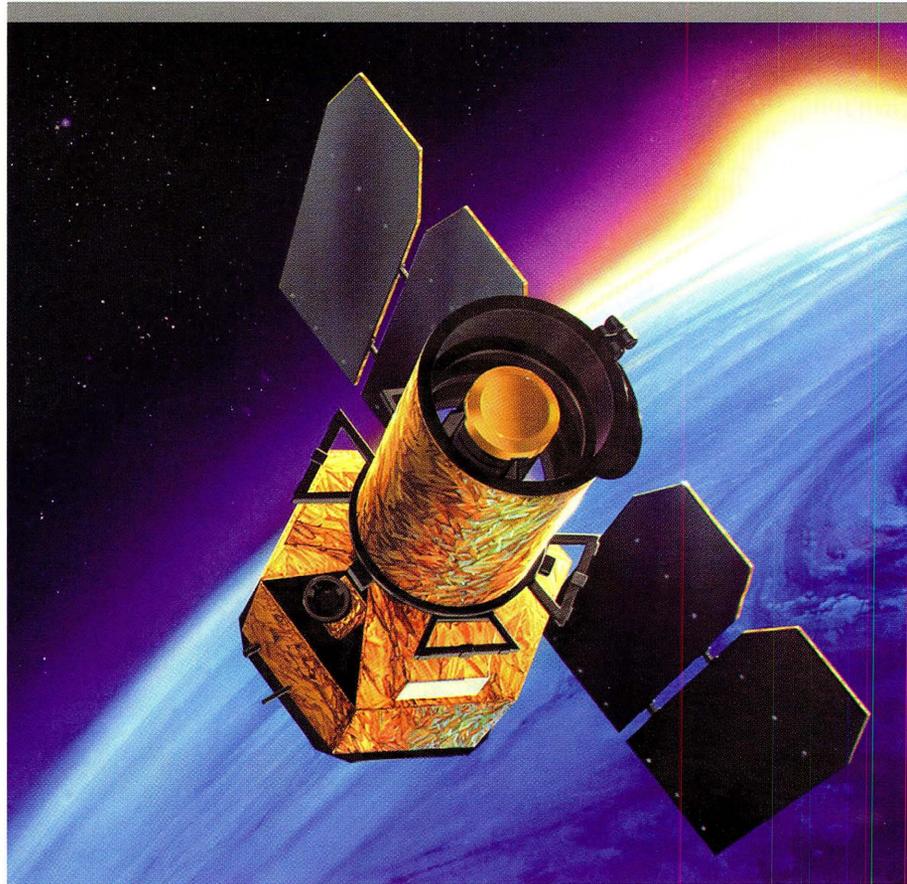
Este segmento consiste de una antena y un receptor GPS capaz de captar señales de microondas. El receptor puede estar en una

estación en Tierra ó en un avión ó barco ó en manos de un peatón. Hay dos tipos de receptores GPS, los que captan una sola frecuencia L1 y los de doble frecuencia, L1 y L2. La figura a la izquierda ilustra un ejemplar del segundo tipo con su respectiva antena. Aquí L1 es 1,2 GHz y L2 es 1.6 GHz. La información que provee el instrumento receptor es la posición de la antena en términos de Latitud, Longitud, Altura y Tiempo. Aunque las señales GPS en sus comienzos eran de uso restringido para aplicaciones militares, en marzo de 1996, debido a presiones comerciales de los mismos fabricantes de los equipos electrónicos GPS, el expresidente norteamericano Bill Clinton autorizó decodificarla para hacerla disponible de manera gratuita a usuarios con propósitos civiles, comerciales y científicos. Este escenario aumentó la producción de los fabricantes y la oferta de dispositivos receptores GPS, los precios bajaron y la demanda se incrementó notablemente. Esta fue una decisión política y de mercadeo que favoreció a muchos sectores de la sociedad. Sin embargo, el Pentágono se reservó el derecho de introducir errores en la señal para manipular la precisión de la información que llega a los receptores, esto se conoce como política de disponibilidad selectiva. En caso de una emergencia aeronáutica el error puede reducirse a la mínima expresión que permita el actual estado del conocimiento.

TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES GPS.

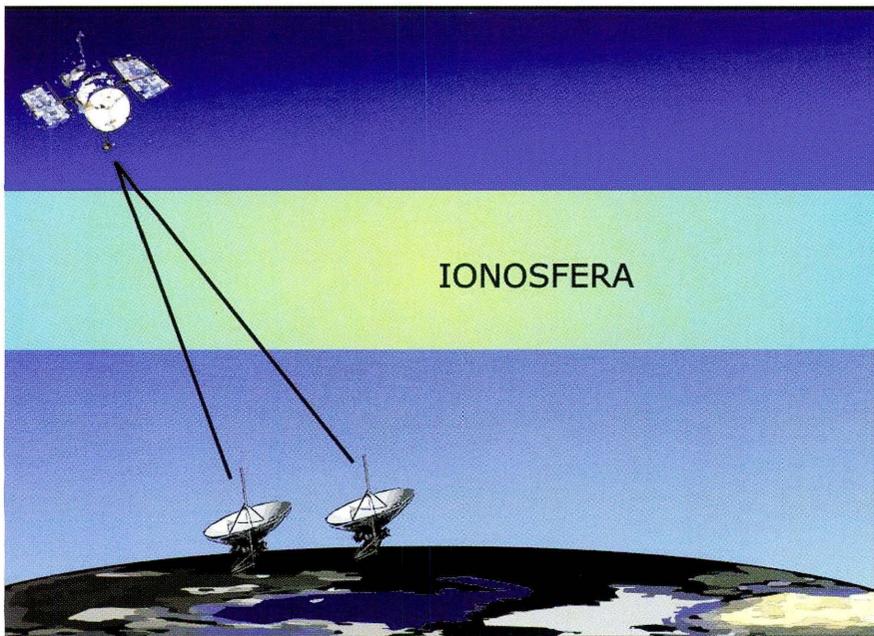
Cada una de las estaciones transmisoras instaladas en los satélites envía permanentemente un mensaje cuya información contiene su tiempo (de sus relojes atómicos) y su localización (efemérides). Cada receptor GPS en Tierra capta simultáneamente esa información de varios satélites, la procesa a través de un algoritmo programado en la memoria de su microprocesador interno y finalmente emite como resultado la ubicación geográfica del receptor. Aquí es donde radica la esencia innovadora de los sistemas GPS.

A manera de ilustración rápida considere que la señal electromagnética se origina en el satélite a la una, diez segundos y cero milisegundos y lleva codificado un mensaje que contiene información del tiempo de origen. La señal viaja a través de la ionosfera, la atmósfera y es captada por el receptor GPS en Tierra un tiempo después. El receptor, como primera



acción registra el tiempo en que recibe la señal, digamos la una, diez segundos y 66 milisegundos. La segunda acción del receptor es descifrar el mensaje codificado que contiene información del momento en que salió la señal del satélite ó tiempo origen. En la tercera acción el algoritmo calcula el tiempo de viaje de la señal (satélite-receptor) y luego multiplica este valor por la velocidad de la luz para obtener la distancia entre el receptor y cada satélite. En este ejemplo es fácil verificar que la distancia calculada es 19800 km. Si los relojes estuvieran fuera de sincronización por un segundo el error sería de 300000 km es decir catastrófico. La distancia así calculada se le denomina pseudorange o pseudodistancia y tiene unidades de longitud. El prefijo pseudo se usa porque la distancia calculada no es necesariamente la verdadera, un factor de error que contribuye se debe fundamentalmente a los efectos del índice de refracción del medio a través del cual viaja la señal, es decir la ionosfera. El mensaje que proviene de cada satélite contiene también los datos de su posición (efemérides) y con estos datos el algoritmo calcula los ángulos entre cada satélite, con el receptor en el vértice, y también calcula otros parámetros. Este proce-

En caso de una emergencia aeronáutica el error puede reducirse a la mínima expresión que permita el actual estado del conocimiento.



Esta es una de las estrategias que se adoptan como método de frontera en la ciencia moderna para estudiar la ionosfera.

dimiento, denominado triangulación, se ejecuta con la información que llega al receptor simultáneamente de por lo menos cuatro satélites. El resultado final es la posición del receptor GPS en Tierra con un rango de error determinado. El mayor error se presenta cuando el número de satélites que envían señales simultáneas es cuatro y puede alcanzar a varias decenas de metros. El error disminuye cuando el número de satélites aumenta. Dependiendo de las características del horizonte un receptor GPS puede captar y procesar señales simultáneamente de hasta doce satélites.

CAMPOS E INSTITUCIONES USUARIAS:

En un comienzo, además de los intereses militares, los objetivos científicos de la constelación NAVSTAR (GPS) eran estudiar con detalle los diferentes movimientos de nuestro planeta y definir universalmente el tiempo. Se debe anotar que los movimientos básicos de la Tierra son los de rotación y traslación pero existen alrededor de 9 modos adicionales de movimiento. Así el sistema satelital se dedicó a proyectos relacionados con aplicaciones geodésicas como identificar coordenadas en la superficie de la Tierra. Como en toda medición siempre existe una incertidumbre, producto de diferentes causas de error, la presencia de la ionosfera, medio a través del cual viajan las señales satelitales, es la principal fuente de

error al medir posiciones sobre la superficie de la Tierra usando métodos satelitales. El reto en ese entonces era modelar la ionosfera para llevar a cabo las correcciones de los errores y así poder obtener con una mejor precisión la posición de un punto sobre la superficie terrestre. En la actualidad ya que con los avances logrados por la geodesia se puede identificar un punto en la superficie de la Tierra con precisión de milímetros entonces los científicos han optado por observar este problema de una manera inversa. Se ha tomado la posición donde se encuentra el receptor como un dato conocido, para así proponer modelos que describan la ionosfera, sus características y comportamiento cambiante. Esta es una de las estrategias que se adoptan como método de frontera en la ciencia moderna para estudiar la ionosfera.

Con un adecuado tratamiento de datos periódicamente recolectados, durante largos períodos de tiempo, los receptores GPS de doble frecuencia ofrecen una precisión de milímetros en la posición reportada. Instalando, sobre bases de concreto, una serie de estos receptores a lo largo y ancho del país se pueden monitorear y determinar vectores de



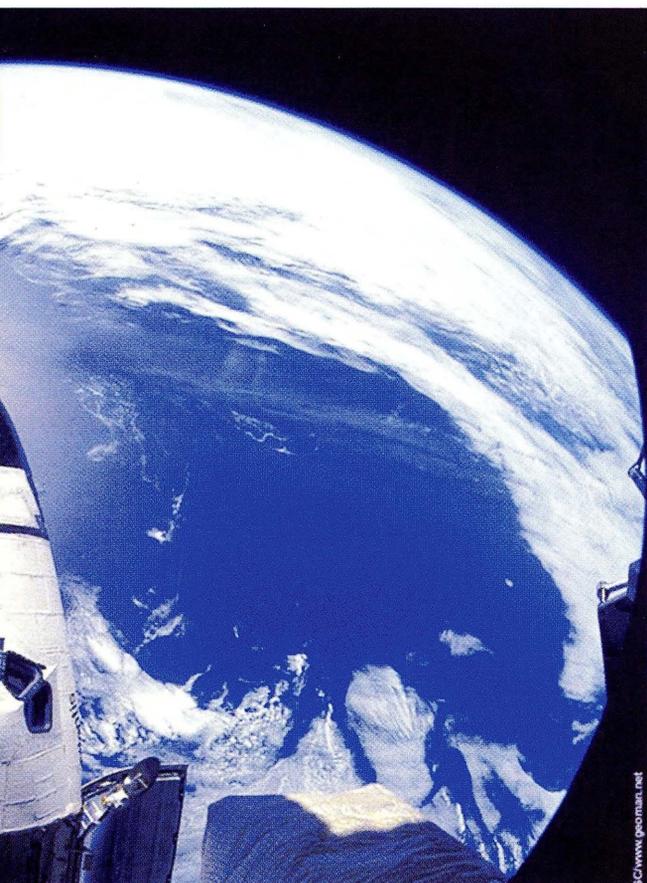
movimiento de diferentes secciones de nuestro territorio y hacer estimados de velocidades del orden de milímetros por año. Esto es de interés para instituciones que monitorean la geografía de nuestro territorio. Otras aplicaciones de los GPS pueden atraer la atención de instituciones interesadas en estudios sobre movimientos telúricos o investigaciones sobre comportamientos de fenómenos de origen vulcanológico. Con algunos aditamentos a los receptores GPS se puede estudiar la composición de humedad de la atmósfera. Esto puede ser de interés para instituciones que estudien el impacto que este parámetro ambiental presenta en las precipitaciones de aguas lluvias por ejemplo.

La aeronomía es el estudio de la alta atmósfera, allí se encuentra la ionosfera, región del espacio que rodea la Tierra en un rango que incluye principalmente desde los 90 hasta los 600 km. La ionosfera, por su composición rica en plasma (átomos ionizados) deteriora las señales que provienen de los satélites GPS y el monitoreo y estudio permanente de las variaciones de estas señales es la base para estudiar las características de la ionosfera colombiana, estas investigaciones se conducen

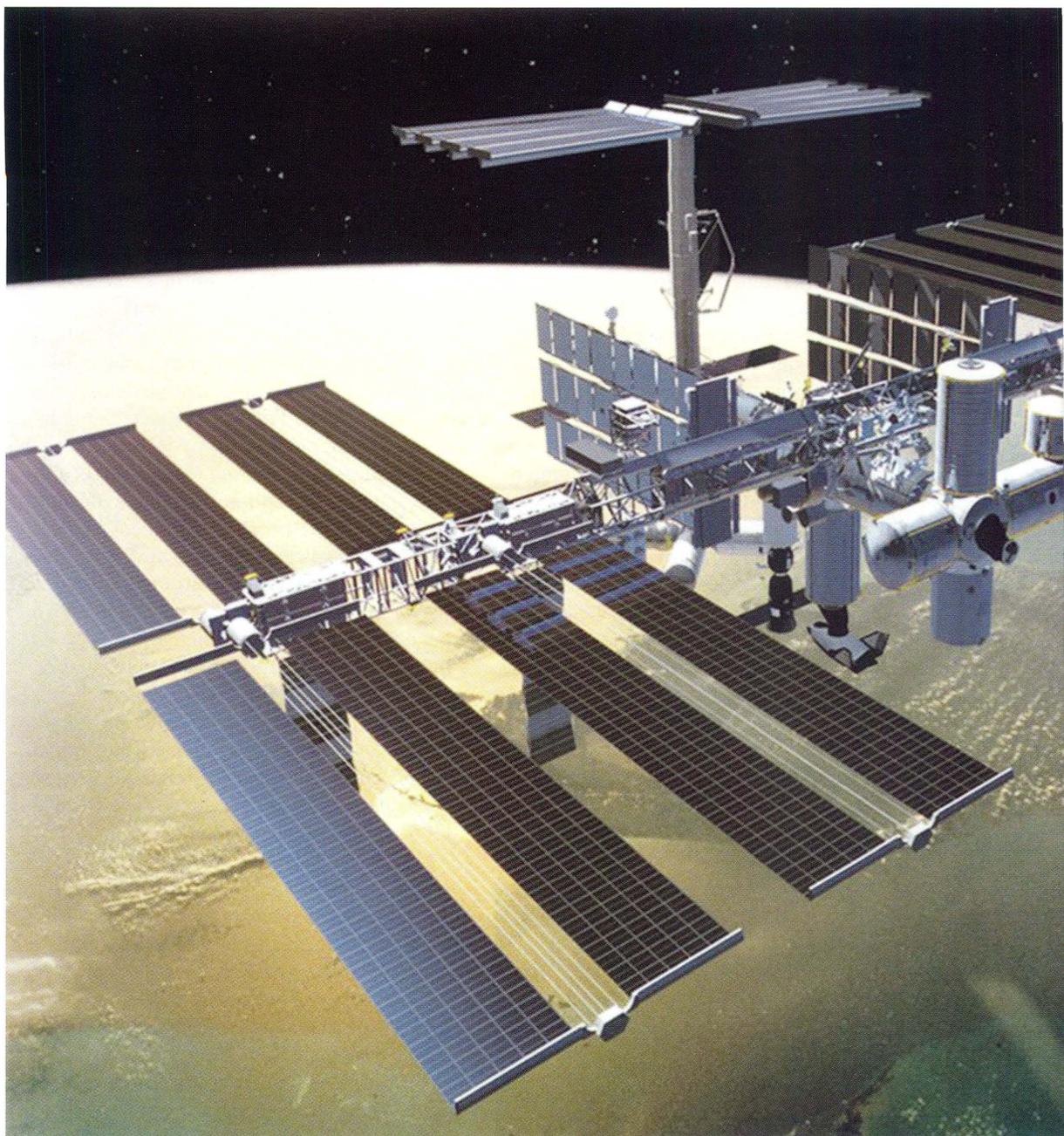
desde la Universidad Nacional de Colombia. Esto también puede ser de interés para instituciones relacionadas con la aeronáutica y telecomunicaciones. Pues la ionosfera en nuestro país por su posición ecuatorial en el planeta es diferente a la ionosfera de medias y altas latitudes. Esta circunstancia origina que los reportes de posiciones de los receptores GPS presenten una incertidumbre mayor en nuestro país. Los algoritmos de los receptores GPS han sido diseñados por los fabricantes para las características de la ionosfera de latitudes medias donde se concentra una mayor densidad de población como Estados Unidos, Unión Europea y Japón. Por ejemplo, incertidumbres de unos pocos metros de la posición de un avión en latitudes medias entregadas por un receptor GPS puede convertirse en varias decenas, o incluso centenas, de metros en latitudes ecuatoriales entregadas por el mismo receptor GPS. Como en la navegación aérea cada vez es mayor la dependencia de los instrumentos de naturaleza GPS este problema puede ser de interés para las instituciones relacionadas con el transporte aéreo. En Trieste, Italia diciembre 2006, en el marco del evento Workshop on the Future for Satellite Navigation and Positioning se reportaron pruebas de aterrizajes exitosos 100% controlados por el sistema de navegación GPS realizados en España.

La navegación marítima ha empleado sistemas denominados hiperbólicos, el sistema satelital TRANSIT y en la actualidad esta evolucionando al uso del sistema GPS. Las exigencias de precisión en los reportes de GPS son mucho menos cruciales que en el aéreo, puesto que no existe una dependencia de reportes de altitud.

En el campo del transporte terrestre aplicaciones relacionadas con el uso de un sistema de navegación global involucran una combinación de un sistema de recepción basado en tecnologías GPS con el uso de sistemas gráficos avanzados. Esta configuración puede proporcionar un sistema guiado desde un punto de una ciudad para evitar ó aliviar drásticamente congestiones caóticas de tránsito local o intermunicipal, para monitorear el transporte de un vehículo de carga de valores, etc. En Colombia el sistema de transporte público Transmilenio se administra usando tecnologías GPS pero el tráfico particular podría beneficiarse inmensamente si las adoptara como herramienta de guía, esto nos pondría en una situación de liderazgo en cuanto



En Colombia deben permanentemente establecerse alianzas, buscar participación en proyectos relacionados con ensayos, pruebas, investigaciones e involucrarse en actividades relacionadas con tecnologías espaciales.



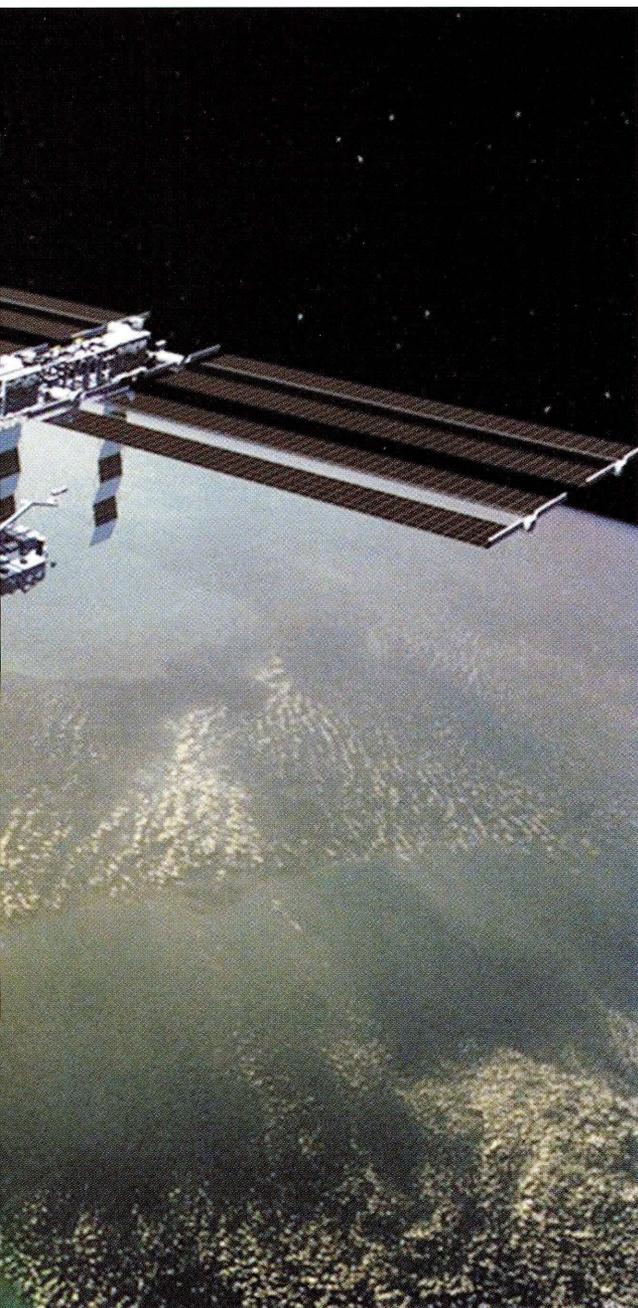
a administración de transporte municipal en Latinoamérica.

En el campo de la agricultura el concepto de manejo de sitio específico de los cultivos usando herramientas de Agricultura de Precisión ha planteado un nuevo sistema de manejo que depende del uso de sistemas satelitales de posicionamiento. Agregar una variable espacial a los datos, análisis y manejo de los cultivos implica agregar coordenadas de cada uno de los pasos llevados a cabo en el manejo del sitio específico. En este caso se realizan

aplicaciones de dosis de insumos controlados con sensores en tiempo real en puntos muy específicos graficando mapas de lecturas y mapas de aplicaciones para luego comparar rendimientos y calidades. Argentina es líder en la utilización de sistemas de posicionamiento satelital para administración y explotación de sus recursos agrícolas.

RETOS Y EVOLUCIÓN:

La dinámica de cambio de la ciencia y la tecnología es bastante agresiva y el campo del



sistema GPS está siendo muy asediado por las exigencias de la comunidad aeronáutica que cada vez plantean nuevos retos. Rusia aparece en la escena de desarrollos tecnológicos de frontera con su constelación de satélites GLONASS para compartir con Estados Unidos la hegemonía del poder de la información de posicionamiento geográfico, en 1982 lanzó su primer satélite. En respuesta a esta competencia surge el advenimiento del sistema GALILEO como un sistema satelital más moderno y concebido como un sistema GPS mejorado y manejado por instituciones civiles.

La Unión Europea se ha aliado con la Agencia Espacial Europea para llevar a cabo esta aventura científica y tecnológica al estado del arte y ya se han realizado las primeras pruebas. Se han identificado debilidades en el sistema GPS pero esto lejos de demeritarlo lo que hace es obligar a evolucionarlo. Para esto han surgido nuevas aplicaciones y servicios involucrando enlaces de redes terrenas con satélites geoestacionarios. Se han diseñado los conceptos de aumentación de sistemas satelitales de navegación global, basados en Tierra, GBAS, y basados en el espacio, SBAS. En la evolución de estas iniciativas están participando muchos países alrededor del globo. El liderazgo es encabezado por los Estados Unidos con los sistemas LAAS y WAAS seguidos de la participación de la Unión Europea con el sistema EGNOS, el Japonés con el sistema MSAS, el sistema GAGAN de la India, el SNAS de la China y el sistema Caribe-Sur América Test Bed, CSTB. Todas estas iniciativas están motivadas a mejorar notablemente los reportes de precisión de las coordenadas de posición geográfica en sus respectivas regiones y representan posibilidades de participación para Colombia.

CONCLUSIONES

El uso de sistemas satelitales de navegación global como el sistema GPS impacta significativamente en la vida cotidiana, científica, tecnológica, seguridad, agricultura de precisión, construcción, sísmica, prevención de catástrofes, delimitación de áreas, transporte aéreo, etc, todos relacionados con la economía del país. En Colombia los sistemas de aeronavegación están bastante bien utilizados, pero no se debe esperar a que otros países desarrollen completamente nuevas tecnologías para luego comprarlas porque en ese entonces ya estarán surgiendo otras versiones más avanzadas y se correría el riesgo de adoptar tecnologías en vía de obsolescencia. Instituciones e Industrias en Colombia deben permanentemente establecer alianzas, buscar nuevas formas de participación en proyectos relacionados con ensayos, pruebas, investigaciones e involucrarse en actividades relacionadas con tecnologías espaciales porque estos métodos están diseñados para resolver problemas en Tierra con mucha eficacia y aunque las inversiones son apreciables no son excesivamente altas puesto que los sistemas han sido concebidos para ser económicamente eficientes y rentables a mediano y largo plazo.

REFERENCIAS

1. Una Estrategia Mundial Para El Gnss - La Perspectiva Europea, Undecima Conferencia De Navegación Aérea, Montreal, del 22 De Septiembre Al 3 De Octubre De 2003
2. El Futuro Del Sistema Gps Como Base Para La Agricultura De Precisión, Ing Agr Axel Von Martín, Proyecto Agricultura De Precisión - Inta Manfredi, 2002
3. Galileo: Iniciativa Européia Para Um Sistema De Navegação Global Por Satélite, Hélio Koiti Kuga, Inpe - Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais, 2006
4. Gnss Augmentations For Civil Aviation, Patricia Doherty, Institute For Scientific Research, Boston College, 2006
5. Implementación Y Utilización De Sistemas Gnss Como Medio De Navegación En El Espacio Aéreo Bajo Jurisdicción De Colombia, 2007
6. Critical Foundations, Reporte 1997
7. Soporte Proyecto Cstb Y Evaluación De Niveles De Servicio Aeronáutica Civil De Colombia, Mario Andrés Lizarazu Ferro, 2005
8. Ionospheric Effects On Near Equatorial Space Based Augmentation Systems (Sbas), P. Doherty, C.e. Valladares, Isr, Boston College, 2007