

## **Sensory substitution: an approach to the experimental study of perception / *Sustitución sensorial: un abordaje para el estudio experimental de la percepción***

Fernando Bermejo and Claudia Arias

*Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Facultad Regional Córdoba – Unidad Asociada de CONICET, Argentina; Facultad de Psicología, Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Argentina*

*(Received 14 January 2013; accepted 28 October 2013)*

**Abstract:** Sensory substitution refers to the phenomenon where object and environment information normally acquired through one sense can be obtained by another sense. For example, visual input being provided by hearing or touching. Sensory substitution devices are technological designs that transform the characteristics of one sensory modality into stimuli of another sensory modality. These devices were developed with two purposes: (1) to assist people with sensory disabilities in daily tasks; and (2) to study the involved mechanisms of brain plasticity. This article reviews studies in which sensory substitution phenomenon is employed as a methodological strategy to study visual perception. Furthermore, its use is discussed as an experimental platform to contrast new perceptual theories and underlying neurophysiological mechanisms that are currently under review.

**Keywords:** perception; sensory systems; perceptual processes

**Resumen:** La sustitución sensorial alude al fenómeno mediante el cual la información sobre los objetos y el ambiente que normalmente se adquiere a través de uno de los sentidos, por ejemplo la visión, se obtiene por otro sentido, la audición o el tacto. Los dispositivos de sustitución sensorial son sistemas tecnológicos diseñados para realizar la transformación de la información entre las diferentes modalidades sensoriales. Fueron creados con un doble propósito: (1) asistir a las personas con discapacidad sensorial en el control de algunas tareas del diario vivir; y (2) estudiar los mecanismos de plasticidad cerebral involucrados. En este artículo se revisan estudios que utilizan el fenómeno de la sustitución sensorial como estrategia metodológica para abordar el estudio de la percepción visual. Además, se discuten sus implicancias como plataforma experimental para contrastar nuevas teorías

---

English version: pp. 1–12 / *Versión en español*: pp. 13–24

References / *Referencias*: pp. 24–26

Translated from Spanish / *Traducción del español*: Liza D'Arcy

Authors' Address / *Correspondencia con los autores*: Fernando Raúl Bermejo, CINTRA, Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba, Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria, 5016 Córdoba Capital, Córdoba, Argentina.

E-mail: [fbermejo@psyche.unc.edu.ar](mailto:fbermejo@psyche.unc.edu.ar)

perceptuales y los mecanismos neurofisiológicos subyacentes que están siendo revisados.

**Palabras clave:** percepción; sistemas sensoriales; procesos perceptuales

There is a long tradition in the design of technology to assist disabled people in their daily living tasks. The simple white cane widely used by visually impaired people and complex sensory substitution devices (SSDs) are clear examples of the effort made over time to compensate for the severe consequences that result from a loss of vision. Sensory substitution (SS) refers to the phenomenon in which objects and environment information normally acquired through one sense, for example, vision, can be obtained by another sense — hearing or touching. In other words, non-visual information can substitute visual information during the control of certain tasks, for example, walking or hitting a ball. It should be emphasized that this phenomenon dismantles the supposedly natural correspondence between the distal stimulus (object in the environment) and proximal stimulus (image in the sense organ), since it is possible to reach the former through proximal stimuli of different sensory modalities. SSDs are technological systems that replace and transform, in real-time, sensory information that the person cannot process due to their impairments, into sensory information that stimulates his functioning senses. Unfortunately the success that was expected from these devices has not yet materialized despite almost 40 years of promising research. A sufficiently robust and reliable SSD that can be used extensively by visually impaired people in their daily lives has not yet been designed (Loomis, Klatzky, & Giudice, 2012).

Despite these difficulties, a field of application where the devices are making headway is in scientific research. SSDs are currently being used more frequently as research tools because they offer a unique opportunity to experimentally study the cognitive, behavioural and neurophysiological processes involved in perception, some of which were only subject to theoretical speculation. The purpose of this paper is to present a critical review of the relevant research made into SSDs in order to analyse their contributions on various issues related to the most crucial scientific matters on perception.

### **SSDs used in research**

A typical SSD is composed of three elements: (1) a sensor or capture unit that acquires stimuli from a sensory modality and transfers them to (2) a coupling system which transduces and transmits the transformed stimulus to another modality through (3) a stimulator. The devices that have been most developed are those that substitute vision; two of the most used in research are: the visual-tactile TVSS (Tactile Vision Sensory Substitution) (Figure 1) consisting of a video camera mounted on the user's head which captures optical images that the system transduces into vibrotactile stimuli which are then applied to any part of the body surface (Bachy-Rita, Collins, Saunders, White, & Scadden, 1969); and the visual-auditory vOICE, consisting of a webcam that captures optical images and transforms them into sounds that are transmitted to the user through headphones (Meijer, 1992). It should be

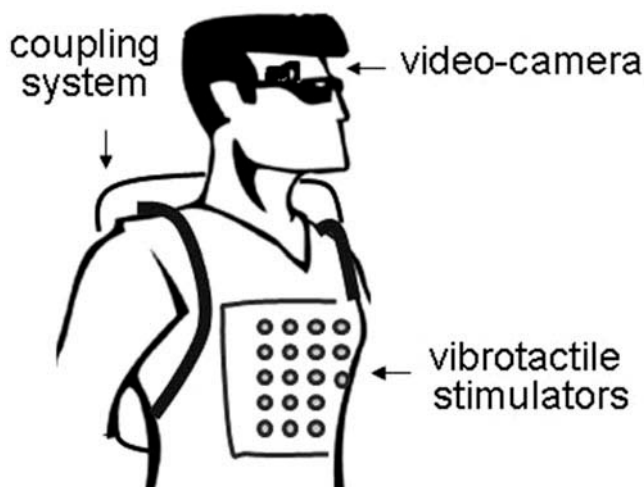


Figure 1. Representation of TVSS.

stressed that in order to use any of these devices the user must have motor control over the input and undergo a training period (Bach-y-Rita & Kercel, 2003).

Recently, minimalist SSD have been developed, with exclusively scientific purposes, which are simplified devices that provide basic ‘all or nothing’ information when they sense the presence or absence of an object, which reduces the learning process. Other devices of this type also provide information on the relative distance of the object (by varying the intensity of the stimulus) and spatial information (depending on the stimulators’ spatial arrangement).

### ***Neurophysiological research on SS***

During the 1960s Bach-y-Rita already argued that mastery of an SSD by a visually impaired participant was a specific example of brain reorganization and speculated that the signals sent to the brain through touch would be processed in regions typically dedicated to vision (Bach-y-Rita, 1967). This hypothesis started receiving empirical support in the late 1980s and throughout the 1990s with studies carried out in animals surgically treated. Research by Sur, Garraghty, and Roe (1988) with ferrets and Rauschecker (1995) with cats, led to an increase of interest in this area of study. The authors demonstrated that it is possible to establish new brain pathways and redefine the function of a particular brain area by surgically manipulating the sensory circuits.

Later, studies into the brains of visually impaired people that have adapted to their impairment emerged as an optimal experimental model to explore these hypotheses (Merabet, Rizzo, Amedi, Somers, & Pascual-Leone, 2005). The addition of advanced neuroimaging technology was significant for these studies as it permitted considerable progress in detailed analysis on neural correlates of perception and brain plasticity phenomena.

There is now growing evidence verifying activation of the occipital cortex — traditionally associated with processing visual stimulus — in visually impaired people when they perform non-visual tasks such as reading Braille, recognizing objects by touch, locating and discriminating sounds (Burton, 2003). Such recruitment expresses the brain's capacity to functionally reorganize itself under specific and significant demands for the individual, which was also observed in congenital and late blind SSD users (Amedi, Kriegstein, Atteveldt, Beauchamp, & Naumer, 2005) and in blindfolded-sighted people who underwent suitable training (Renier, Collignon et al., 2005); it was also demonstrated with TVSS (Ptito, Moesgaard, Gjedde, & Kupers, 2005) and with vOICE (Amedi et al., 2007).

### ***Behavioural research on SS***

#### *Complex SSDs*

The group led by Bach-y-Rita were able to demonstrate in their first studies that users of TVSS could explore a scene and recognize and intercept objects, experience visual perspective notions and perform simple locomotion tasks (Bach-y-Rita, 1972; Collins, 1985). Subsequently, they systematized the perceptual learning that occurs as follows (Bach-y-Rita & Kerckel, 2003): (1) the person learns how the changes in their sensations are linked as a result of the actions taken; (2) when motor control of the device is successful they begin to distinguish lines and volume; (3) later, they experience images in space and learn to make perceptual judgements using visual concepts such as perspective, parallelism and depth estimations. Regarding sensations, initially the user only feels tactile stimulation of the device. As learning progresses, they gradually forget these tactile sensations and perceive stable objects at a certain distance as being 'out there in the world', that is, they succeed the distal attribution of proximal stimuli.

More current studies are interested in exploring subjects such as underlying perceptual mechanisms, the role of movement in perception and other aspects of perceptual learning. By way of example: Renier, Laloyaux, et al. (2005) and Renier, Bruyer, and De Volder (2006) investigated the nature of substituted perception by studying the effect of optical illusions in blind and blindfolded-sighted participants equipped with an SSD. The authors noted that, unlike sighted people, blind people did not experience optical illusions, which demonstrates, first, that substituted perception is different in each participant; and second, that prior visual experience is a necessary condition for the effect of optical illusions.

Auvray, Philipona, O'Regan, and Spence (2007) researched the performance of blindfolded-sighted participants equipped with vOICE in dynamic localization and 3D object recognition tasks. Participants, who had undergone extensive training, were able to guide themselves using vOICE to solve the tasks. They further noted that, with practice, their perception structured into immediate apprehension similar to what happens in natural perception that is not technologically assisted.

Kim and Zatorre (2008) studied the perceptual learning generalization process in recognition and identification of familiar and novel objects tasks in blindfolded-sighted participants equipped with vOICE. One group of participants underwent a brief training session while the other group only received verbal instructions on how the device works. No differences in performance were observed in either group in a task that involved the recognition of simple shapes, suggesting that learning is intuitive for simple tasks. However, they continued to train participants to assess their performance in more complex recognition tasks, and participants were eventually able to identify new object shapes once they mastered the device's conversion rules. This generalization process explains the expert performance of SSD users in real environments that are constantly changing.

### *Minimalist SSD*

The following studies have been chosen in order to cover a wide range of research using different types of minimalist SSD.

The Suppléance Perceptive group from the University of Compiègne, France, developed two visual-tactile devices. The first one uses a photoelectric cell attached to the tip of the forefinger of one hand that is connected to a vibrotactile stimulator held with the other hand. The stimulator generates a tactile stimulus when the cell senses a light intensity above a set threshold (Figure 2). Without any visual cues and by freely moving the hand that held the photoelectric cell, participants are able, after a few minutes, to locate an illuminated object. Experiments conducted with blind and blindfolded-sighted participants using different types of stimuli (a beep, vibration, among others) and stimulating diverse parts of the body, showed that none of these variables had a significant effect over the participant performance. These results support hypotheses that perception stems from an establishment of sensorimotor relationships regardless of the nature of the input (Lenay, Canu, & Villon, 1997).

Using this device Siegle and Warren (2010) studied a phenomenon that is hard to investigate in natural perception, distal attribution of the perceived object. They identified two types of strategies used by participants when they were learning

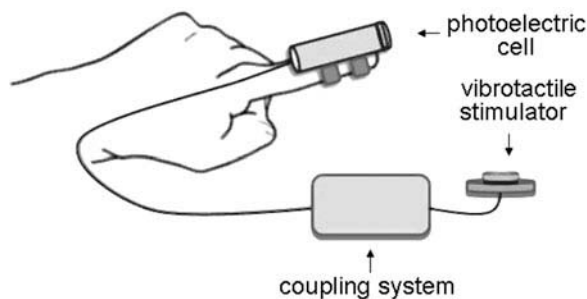


Figure 2. Representation of the device developed by Lenay et al. (1997).

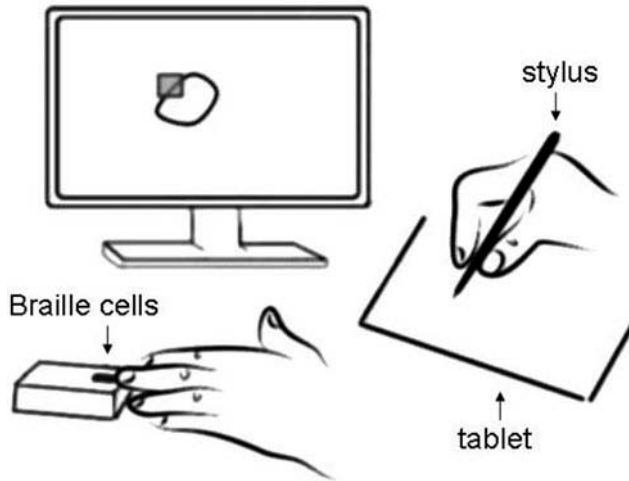


Figure 3. Representation of the TACTOS device.

how to use the SSD: (1) a perceptual strategy, which is focused directly on the environment in order to sense the presence of the physical object (distal stimulus); (2) a deductive strategy, which is focused directly on the vibrotactile stimulation (proximal stimulus) in order to infer the presence of the object. They demonstrated that distal attribution only occurred in participants who used the perceptual strategy to solve a task of locating objects, and that in addition they were also more accurate than those using the deductive strategy.

The second device developed by the French group was TACTOS, and it consists of a tablet with a stylus, a PC and Braille cells (Figure 3). It allows the user to recognize geometrical shapes presented on a screen by moving a cursor and receiving on/off tactile stimulation when the cursor's receptor field encounters at least one black pixel. The participant is blindfolded and moves the cursor using the stylus on the graphic tablet. The tactile stimulation is delivered to the other free hand by the Braille cells. Experiments demonstrated that blind and sighted participants equipped with the device were able to recognize increasingly complex geometric shapes (Ammar, Gapenne, Blomme, and Rovira, 2005). In addition, this SSD offers, as an heuristic advantage, the possibility to analyse the movements made by the participant with the stylus, i.e., their perceptual trajectory. This makes it possible to study sensorimotor rules in play and identify different strategies used to solve the task, for example, different types of scanning or tracking the contours of the shape (Ziat, Gapenne, Stewart, & Lenay, 2007).

Another device is the Enactive Torch, designed by Froese and Spiers (2007), which guides users' movement without visual cues. It has an infrared or ultrasonic sensor which is held in the hand, a mobile operation unit and a tactile stimulator adhered to the other hand (Figure 4). The torch provides

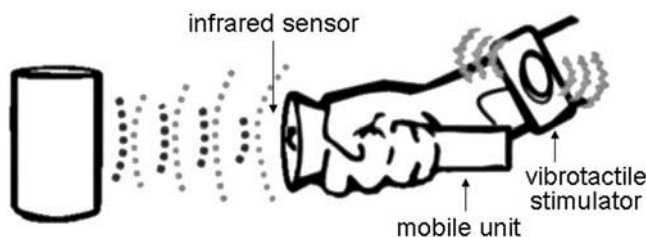


Figure 4. Representation of how the Enactive Torch works. The vibrotactile stimulator is activated when the sensor detects the presence of an object / obstacle.

information on the relative distance between the object and the user according to the following rule: the closer the object, the greater the vibration and vice versa, the further away the object, the lesser the vibration. Froese, McGann, Bigge, Spiers, and Seth (2012) assessed sighted participants performing a locomotion test. Most of them could guide themselves and move with only the information provided by the device, and several of them experienced distal attribution of proximal stimuli. These types of experiments, the authors note, encourage discussion on the new issue of the relationship between perception, movement and perceptual consciousness — the knowledge that the person has about their own experience (the Open Source project can be found at <http://enactivetorch.wordpress.com/enactive-torch-3-0-technical-details/>).

Bird, Marshall, and Rogers (2009) designed prototypes inspired by TVSS to determine the minimum conditions vibrotactile stimulation needed to guide certain behaviour. The devices generally consisted of a camera on top of the head, a PC and vibrotactile stimulators attached to the abdomen. They found that with only six stimulation points, users were able to perform a simple task that consisted of visually tracking a ball and with 20 points they could stop the ball when it moved slowly towards them. Interestingly, these experiences argue in favour of Clark's (2003) philosophical 'extended mind' theory, which postulates that the mind is not only located in the head and that cognition arises from a hybrid combination of biological and non-biological components. In this context, the SSD becomes an extension of the user by allowing them to experience their environment.

Díaz, Barrientos, Jacobs, and Travieso (2012) developed a specific device for sensing uneven floor surfaces. It is composed of a capture module comprised of four cameras that register the participant's movements and the floor surface, a PC and 24 vibrotactile stimulators that are vertically aligned on the user's back. On a flat floor, the participant receives a uniform stimulation pattern but the presence of unevenness or objects results in variations in the pattern (Figure 5). The authors conducted a series of experiments with blindfolded-sighted participants. They performed tasks that involved detecting the presence of objects, with and without motor control over the input (active and passive condition, respectively). In the

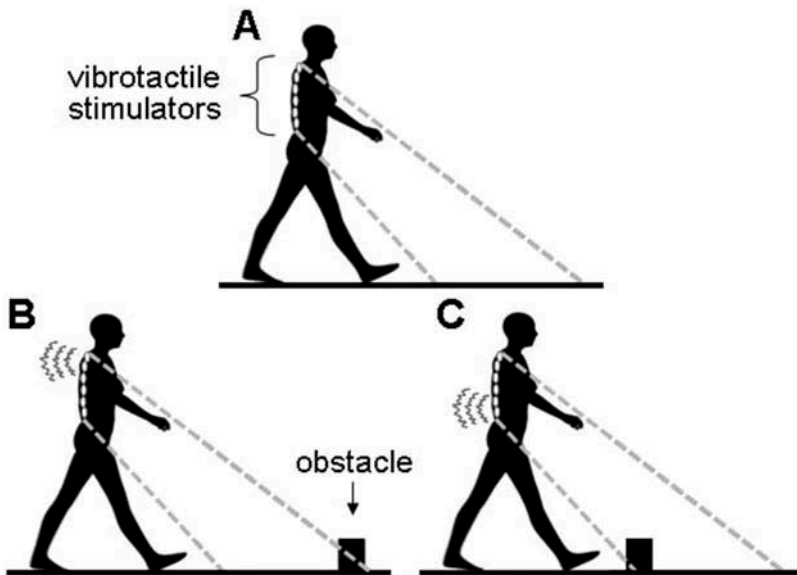


Figure 5. Schematic representation of how the of Díaz et al. (2012) works in order to perceive unevenness in the floor surface. In (A), it appears the user on a floor without unevenness, thus the stimulators maintain a uniform level of activation. In (B), due to the presence of unevenness in the floor (an obstacle) away from the user, the upper stimulators are activated differently. In C, due to the presence of unevenness near the user, the lower stimulators are activated differently.

active condition, participants explored the environment with displacements and movements of their body axis; in the passive condition, the participant received stimulation patterns generated by participants of the active condition. Participants in the former group performed significantly greater than participants from the latter group. Díaz et al. (2012) suggest that a mechanism that is similar to optical flow — defined as the pattern of apparent motion of objects, edges and surfaces in a scene caused by the relative motion between the observer and the scene — could be operating in the vibrotactile domain.

Bermejo, Ramos, and Arias (2009) used a minimalist visual-auditory SSD which consists of a motion sensor mounted on the participant's head, a computer program designed to simulate invisible (virtual) geometric figures in front of him/her and headphones as a stimulator. Each time the sensor makes contact with the figure, the device emits a specific ringing that is only silenced when it is no longer in contact (Figure 6). The authors studied how blind and sighted people, equipped with the device, explored spaces by freely moving their heads to recognize geometric shapes. The results showed that both groups were able to identify the invisible geometric figures without receiving prior training. Consistent with Ziat et al. (2007), they also described the sensorimotor strategies developed by participants.



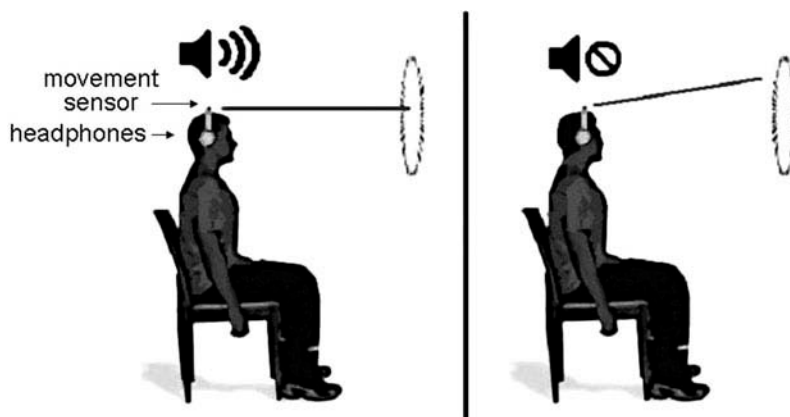


Figure 6. Representation of minimalist visual-auditory device used by Bermejo et al. (2009).

### **Contributions of the SS phenomenon to current debates about perception**

In recent years studies from different disciplines (neurophysiology, psychology, philosophy, among others) have suggested new ways of studying perception and associated phenomena. The generation of new evidence is challenging traditional knowledge about perceptual modalities, functional organization of the cerebral cortex and perceptual consciousness, among other issues.

It was traditionally believed that each perceptual experience corresponded to a specific sensory input and an accompanying neural correlate. However, new approaches suggest that to explain any changes in the experience, the dynamic patterns of interdependence between sensory stimulation and embodied activity must also be considered (Hurley & Noë, 2003). In other words, neural responses do not linearly co-vary with external stimuli but are determined by sensorimotor dynamics involved in perceptual consciousness. As these dynamics include the mind, body and environment, an explanatory unified level that is able to navigate through the involved components is sought by using a sensorimotor approach (O'Regan & Noë, 2001; Venturelli, 2011). Along these lines, studies using SSD are an important platform for the empirical study of perceptual consciousness, as they demonstrate that the activity of a specific sensory organ and its association with certain brain areas are not sufficient conditions to explain the person's experience (Fingerhut, 2009).

Diverse questions revolve around the nature of substituted perception, the processes involved and the qualitative experience of SS. For example, does the brain process tactile or auditory stimuli as such or does it (re)convert and process them as visual stimuli? So, is the nature of substituted perception determined by the modality that substitutes or by the substituted modality?

Some researchers argue that perception experienced with a visual-auditory or visual-tactile SSD is more like the sensory modality that substitutes, hearing or touch (Block, 2003; Humphrey, 1992), while others argue that perception is experienced as the substituted mode, vision (Hurley & Noe, 2003). To examine this question Ward and Meijer (2010) studied the experience of people with

acquired blindness who were skilled in the use of vOICE. They concluded that these users experienced detailed visual phenomenology developed by the sustained use over several months of the SSD and that this consciousness also depended on previous visual experience. Proulx (2010) suggests that very accurate sensorimotor training is needed to develop such multimodal mastery.

It is normally believed that the sensory organ involved in the perceptual act is the one that determines the perceptual modality; in the case of visual-auditory or visual-tactile SS it would be ear or skin, that is, the modality that substitutes. However, according to sensorimotor arguments, sensory information is generated from the interaction mode between the preceptor and his/her environment. For example, a simple sensorimotor interaction law in the visual domain would be: 'when I approach an object, its image enlarges; when I move away from it, the image decreases'. If the use of an SSD contemplates the possibility of establishing such laws, the user could get the same information from the domain of hearing or touch, indicating that these laws are amodal, as argued by Díaz et al. (2012). Thus, any attempt to understand ways of perceiving must consider the sensor's tendency to adapt in its relationship with the environment. In other words, a stable way of perceiving is structured not only by the agent's biological sensitivity but also includes its goal and the set of skills or expertise developed over a given time (McGann, 2010).

In turn, Auvray and Myin (2009) argued that the perception experienced with an SSD cannot be equated to another phenomenon or can be reduced to usual perception. On the contrary, these devices are tools that extend the ability to perceive in a whole new way. In the same vein, it has been postulated that the experience of an SSD should be considered an extended experience that is different to any other previous experience (Kiverstein & Farina, 2012).

Results arising from neurophysiological research have important implications and relevance in this discussion. Recently, new theories in neuroscience have challenged the classical notions of sensory modality and its cerebral locations. One line of pioneering research has been conducted by Amedi and collaborators, who in 2002 had already found that a specific area of the occipital cortex can be activated by visual or tactile recognition of 3D objects; they called the region lateral occipital tactile-visual (LOtv) (Amedi et al., 2002). In 2007 they studied the activation of the LOtv region while participants used a visual-auditory SSD. They conducted an experiment with participants who had been trained in the use of vOICE (seven sighted and two blind people) and participants who had not been trained (seven sighted people); the latter group had been taught to associate, randomly, certain vOICE sounds with certain shapes. All participants heard sounds emitted from the vOICE while their cortical activity was recorded with the Functional Magnetic Resonance technique. The results revealed that the area under study was activated only in the people who had been trained, that is, they were the only people who could extract information on the 3D objects from the sounds (Amedi et al., 2007). Two years later, Merabet,

Battelli, Obretenovaa, Maguirea, Meijer, and Pascual-Leone (2009) applied the Repetitive Transcranial Magnetic stimulation (rTMS) technique to the LOTv region of a person who had acquired blindness and was highly trained in the use of vOICE, to understand its effect on the ability to recognize shapes. Their performance was significantly affected, that is, the rTMS had a disruptive effect on their proven ability to recognize shapes. Accordingly, during stimulation, the participant experienced a sense of darkening and mentioned that the task was difficult: he needed to listen carefully to the sounds to find helpful clues, rather than simply ‘seeing things’ as he usually did.

The authors of these last neurophysiological studies agree that regardless of the type of sensory input, the region under study is activated through shape recognition tasks. The results point in favour of a metamodal brain theory (Pascual-Leone & Hamilton, 2001) which posits that the organizing principle of the brain regions would be more linked to task requirements — for example, localization and recognition of objects — than input or the sense organ involved. Supporting this hypothesis implies rejecting deeply-rooted ideas in neurophysiology. In this sense, discussions in the area of SS should be amended: first, discussion on the nature of substituted perception becomes meaningless because the (uni)modal processing and/or a special recoding of information possibilities are dispelled. Second, positions that consider the goal of perception and the skills involved as determinants of the perceptual form used gain strength (e.g., Auvray & Myin, 2009; McGann, 2010)

Two corollaries follow from these new considerations: (1) to successfully master a SSD it is essential that the task be relevant and necessary to daily performance for the user (recognize objects, for example); (2) vision, hearing and touch form a single spatial perception system that works with redundant information. This would explain the dynamic interplay between modalities that occur in real, everyday situations and specific phenomena such as SS and synaesthesia. Consequently the concept of information referring to processes of reception, transmission and data coding loses relevance. In new theoretical perspectives, information acquires value when the dynamic relationship between organisms and their environments is functional and has ecological significance. In addition, the multimodal nature of the information provided by objects and everyday life events is further evidenced.

### **Final remarks**

A non-exhaustive review was presented of the relevant research on SS that emphasizes the excellent possibility that this phenomenon can provide as an experimental resource for studying perception. The originality and quality of the resulting information could not have been achieved with any other methodological strategy. Along these lines Lenay, Gapenne, Hanne-ton, Marque, and Geouelle (2003) state that SS offers a unique opportunity to study the genesis of a percept and sensorimotor and cognitive processes involved as sighted and blind people

who have been equipped with an SSD for the first time become novice participants in a new perceptual modality.

The increasing incorporation of SSD into current research offers the possibility to contrast revolutionary hypothesis about neurophysiological and cognitive mechanisms involved in perception. A transition from understanding the SS as an object to be studied to treating it as a methodological paradigm or an experimental strategy is taking place.

From a neurophysiology perspective, the SS phenomenon offers a key to understanding the structural and functional bases of multimodal phenomena. In light of this research, new theories have been developed on the functional organization of the sensory cortex that challenge traditional notions of brain areas.

Behavioural evidence, in turn, provides particular empirical support to the development of new theories framed within the broad term of embodied cognitive science. Work on SS highlights the indissoluble unity that the individual and his environment forms by considering the inescapable role that exploratory movements have in the perception of real situations. These studies also encourage discussions on the cognitive potentials arising from the interaction between mind and machine, such as Clark hypothesizes in his thesis of the extended mind: SSD users are revealed as bodily platforms in constant negotiation and re-negotiation between the senses, experiences and reasoning, which constantly seek opportunities to maximize the dynamic properties of the body and the world (Clark, 2008).

Minimalist SSD circumscribe the user to a new perceptual space that emerges as it is being used. They make it clear that for perception to exist, there needs to be a synthesis of temporal sequence of actions and sensations in the form of laws of covariation between movements and stimulation (Auvray et al., 2007; Lenay & Steiner, 2010). In this sense, minimalist devices generate a simplified scenario that is particularly suitable for studying the structuring of perceptual space from the establishment of those sensorimotor laws.

## **Sustitución sensorial: un abordaje para el estudio experimental de la percepción**

Existe una extensa tradición en el diseño de ayudas tecnológicas para asistir a la persona discapacitada en su diario vivir. El sencillo bastón blanco ampliamente utilizado por la persona ciega y los complejos dispositivos de sustitución sensorial (DSS), son claros ejemplos del esfuerzo sostenido a lo largo del tiempo para compensar las severas consecuencias que acarrea la pérdida de la visión. La sustitución sensorial (SS) alude al fenómeno mediante el cual la información sobre objetos y el ambiente que normalmente se adquiere a través de un sentido, por ejemplo la visión, puede obtenerse a través de otro sentido, por ejemplo, la audición o el tacto. En otras palabras, la información no visual puede sustituir a la información visual en el control de algunas tareas, por ejemplo: locomoción, batear una pelota. Es oportuno destacar que este fenómeno desarticula la correspondencia supuestamente natural entre el estímulo distal (objeto del ambiente) y el proximal (imagen en el órgano sensorial), ya que es posible acceder al primero a partir de estímulos proximales de diferentes modalidades sensoriales. Los DSS son sistemas tecnológicos que reemplazan y transforman, en tiempo real, la información sensorial que la persona no puede procesar por su discapacidad, en información sensorial que estimula alguno de sus sentidos intactos. Desafortunadamente el éxito augurado para estos dispositivos está lejos de cumplirse a pesar de casi cuarenta años de investigación promisoriosa. No ha podido lograrse aún, un DSS suficientemente robusto y fiable como para que las personas ciegas lo usen masivamente en su desempeño cotidiano (Loomis, Klatzky, y Giudice, 2012).

Otro campo de aplicación de estos sistemas que está superando la decepción señalada en su vertiente aplicada, es la investigación científica. Los DSS se utilizan cada vez con mayor frecuencia como herramientas de investigación, ya que ofrecen una oportunidad privilegiada para estudiar de manera experimental los procesos cognitivos, comportamentales y neurofisiológicos involucrados en la percepción, alguno de los cuales sólo eran objeto de especulaciones teóricas. El objetivo del presente artículo es presentar una revisión crítica de investigaciones relevantes con DSS para analizar sus contribuciones en diversos temas relacionados a la percepción de candente actualidad científica.

### **DSS utilizados en investigación**

Un DSS típico está compuesto por tres elementos: (1) un sensor o unidad de captura que adquiere estímulos de la modalidad sensorial y los deriva a (2) un sistema de acoplamiento que transduce y transmite el estímulo transformado a



Figura 1. Representación del TVSS.

otra modalidad a través de (3) un estimulador. Los dispositivos que sustituyen la visión son los que más desarrollo han tenido, dos de los más utilizados en investigación son: el viso-táctil TVSS (Tactile Vision Sensory Substitution) (Figura 1) que consta de una cámara de video montada sobre la cabeza del usuario que captura las imágenes ópticas y el sistema las transduce a estímulos vibrotáctiles que son aplicados en alguna parte de la superficie corporal (Bach-y-Rita, Collins, Saunders, White, & Scadden, 1969); y el viso-auditivo vOICE, que consta de una cámara web para capturar las imágenes ópticas y las transforma en sonidos que se transmiten al usuario a través de auriculares (Meijer, 1992). Es necesario resaltar que para dominar cualquiera de estos dispositivos es necesario que la persona tenga control motor sobre la información de entrada y que supere un indispensable período de aprendizaje (Bach-y-Rita & Kerckel, 2003).

Recientemente, con fines exclusivamente científicos, se han desarrollado los DSS minimalistas, que son dispositivos simplificados que proveen información elemental de tipo ‘todo o nada’ cuando sensan presencia o ausencia del objeto experimental, lo cual reduce el mencionado proceso de aprendizaje. Otros dispositivos de este tipo proveen además, información sobre distancia relativa del objeto (variando la intensidad del estímulo) e información espacial (en función de la disposición espacial de los estimuladores).

### ***Investigaciones neurofisiológicas sobre SS***

Bach-y-Rita ya en la década del 60 sostenía que el logro del dominio de un DSS por parte de un participante ciego era un ejemplo concreto de reorganización cerebral y conjeturó que las señales enviadas al cerebro a través del tacto estarían siendo procesadas en regiones abocadas típicamente a la visión (Bach-y-Rita, 1967). Esta hipótesis recién comenzó a recibir apoyo empírico a fines de los 80 y durante los 90, con trabajos realizados en modelos animales intervenidos

quirúrgicamente. Las investigaciones de Sur, Garraghty, & Roe (1988), con hurones y de Rauschecker (1995), con gatos, significaron una fuerte impronta en esta área de estudio. Los autores demostraron que es posible establecer nuevas vías cerebrales y redefinir la función de una determinada área cerebral manipulando quirúrgicamente los circuitos sensoriales.

Más adelante, el estudio del cerebro de la persona ciega adaptada a la discapacidad, se erigió como modelo experimental óptimo para explorar estas hipótesis (Merabet, Rizzo, Amedi, Somers, & Pascual-Leone, 2005). La inclusión de tecnología de neuroimagen de avanzada significó un verdadero impulso para estos estudios, dado que permitió avanzar sobre el análisis detallado de los correlatos neuronales de la percepción y los fenómenos de plasticidad cerebral.

En la actualidad existe creciente evidencia que constata la activación de la corteza occipital — asociada tradicionalmente al procesamiento de estímulos visuales — en personas ciegas cuando realizan tareas no visuales como lectura Braille, reconocimiento táctil de objetos y localización y discriminación de sonidos (Burton, 2003). Este tipo de reclutamiento expresa justamente la capacidad de reorganización funcional del cerebro ante demandas específicas y significativas para el individuo. Lo cual también se observó tanto en usuarios de DSS ciegos congénitos y tardíos (Amedi, Kriegstein, Atteveldt, Beauchamp, & Naumer, 2005) como en participantes con visión normal ocluida sometidos a un conveniente entrenamiento (Renier, Collignon, et al., 2005); asimismo pudo demostrarse tanto con el TVSS (Ptito, Moesgaard, Gjedde, & Kupers, 2005) como con el vOICe (Amedi et al., 2007).

## ***Investigaciones comportamentales sobre SS***

### *DSS complejos*

El grupo liderado por Bach-y-Rita pudo demostrar en sus primeros trabajos, que los usuarios del TVSS eran capaces de explorar una escena para reconocer e interceptar objetos, experimentar el fenómeno de la perspectiva visual y realizar sencillas pruebas de locomoción (Bach-y-Rita, 1972; Collins, 1985). Posteriormente, sistematizaron el logro de este aprendizaje perceptual de la siguiente manera (Bach-y-Rita & Kercel, 2003): (1) la persona aprende cómo se vinculan los cambios en sus sensaciones a raíz de las acciones que realiza; (2) cuando logra el control motor del dispositivo comienza a distinguir líneas y volumen; (3) más adelante, experimenta imágenes en el espacio y aprende a emitir juicios perceptuales utilizando conceptos visuales como perspectiva, paralelismo y estimaciones de profundidad. En relación a las sensaciones, al principio el usuario solamente percibe la estimulación táctil del dispositivo. A medida que progresa el aprendizaje, se olvida poco a poco de estas sensaciones táctiles y percibe objetos estables a cierta distancia ‘allí afuera en el mundo’, es decir, logra realizar la atribución distal de los estímulos proximales.

Estudios más actuales se interesan en profundizar algunos tópicos tales como los mecanismos perceptuales subyacentes, el rol del movimiento en la percepción y otros aspectos del aprendizaje perceptual. A modo de ejemplo: Renier, Laloyaux, et al. (2005) y Renier, Bruyer, y De Volder (2006) indagaron sobre la naturaleza de la

percepción sustituida con protocolos de ilusiones ópticas en personas con y sin discapacidad visual equipadas con un DSS. Los autores observaron que, a diferencia de las personas con visión normal, las personas ciegas no experimentaron las ilusiones ópticas. Lo cual pone en evidencia, por una parte, que la percepción sustituida de ambos participantes es diferente y por la otra, que la experiencia visual previa es condición necesaria para que ocurra la ilusión óptica.

Auvray, Philipona, O'Regan, y Spence (2007) investigaron el rendimiento de participantes con visión normal equipados con el vOICE, sometidos a un extenso entrenamiento, en pruebas dinámicas de localización y reconocimiento de objetos 3D. Los participantes lograron guiarse con el vOICE para resolver las tareas. Observaron además que, con la práctica, la percepción se estructuró como aprehensiones inmediatas semejante a lo que ocurre en la percepción natural no asistida tecnológicamente.

Kim y Zatorre (2008) estudiaron, en participantes con visión normal equipados con el vOICE, el proceso de generalización del aprendizaje perceptual en tareas de reconocimiento e identificación de objetos familiares y nóveles. Un grupo fue sometido a un breve entrenamiento mientras que el otro grupo sólo recibió indicaciones verbales del funcionamiento del dispositivo. No se observaron diferencias en el rendimiento de ambos grupos en una tarea de reconocimiento de formas sencillas, lo cual sugiere que el aprendizaje es intuitivo para tareas simples. Posteriormente, continuaron entrenando a los participantes para evaluarlos en tareas de reconocimiento de formas más complejas, quienes finalmente lograron identificar la forma de objetos nóveles una vez que dominaron las reglas de conversión del dispositivo. Este proceso de generalización explicaría el desempeño experto de usuarios de DSS en ambientes reales en constante cambio.

### *DSS minimalistas*

La serie de estudios que se describe a continuación, ha sido seleccionada con el propósito de cubrir un amplio rango de investigaciones que utilizaron diferentes tipos de DSS minimalistas.

El grupo Suppléance Perceptive de la Universidad de Compiègne, Francia, desarrolló dos dispositivos viso-táctiles, el primero de los cuales consta de una célula fotoeléctrica fijada en la punta del dedo índice de una mano y conectada a un estimulador vibrotáctil que es sostenido con la otra mano, el que genera un estímulo táctil sólo si la célula sensa intensidad lumínica por encima de un umbral establecido (Figura 2). Los participantes, sin claves visuales y moviendo libremente la mano que posee la célula fotoeléctrica son capaces, luego de algunos minutos, de localizar un objeto luminoso. Experiencias llevadas a cabo con personas ciegas y con visión normal ocluida, con distintos tipos de estímulos (bip auditivo, vibración, entre otros) y ubicaciones del estimulador en varias partes del cuerpo, demostraron que ninguna de estas variables tiene efecto significativo sobre el desempeño del participante. Estos resultados apoyan hipótesis que sostienen que la percepción se origina a partir del establecimiento de relaciones



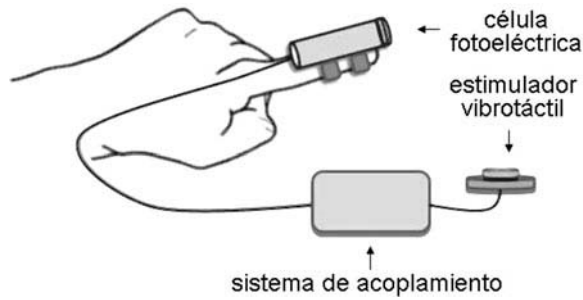


Figura 2. Representación del dispositivo desarrollado por Lenay et al. (1997).

sensoriomotrices independientemente de la naturaleza de la información de entrada (Lenay, Canu, & Villon, 1997).

Recientemente, Siegle y Warren (2010), con este dispositivo estudiaron un fenómeno de difícil abordaje en la percepción natural, la atribución distal del objeto percibido. Identificaron dos tipos de estrategias utilizadas por los participantes cuando aprendían a utilizar el DSS: (1) estrategia perceptual, enfocada en atender de manera directa el entorno para percibir la presencia del objeto físico (estímulo distal); (2) estrategia deductiva, enfocada en atender la estimulación vibrotáctil (estímulo proximal) para inferir la presencia del objeto. Demostraron que la atribución distal ocurría sólo en los participantes que utilizaron la estrategia perceptual para resolver una tarea de localización de objetos, quienes además fueron más precisos que quienes usaron la estrategia deductiva.

El segundo dispositivo desarrollado por el grupo francés es el TACTOS, compuesto de una tableta gráfica con estilete, una PC y celdas Braille donde se apoya un dedo (Figura 3). Mediante los movimientos del estilete sobre la tableta y los concomitantes estímulos táctiles que recibe en el dedo, el participante explora sin claves visuales, figuras que se presentan en la pantalla de la PC. Se logró demostrar que personas con y sin discapacidad visual equipadas con el dispositivo, pudieron reconocer figuras

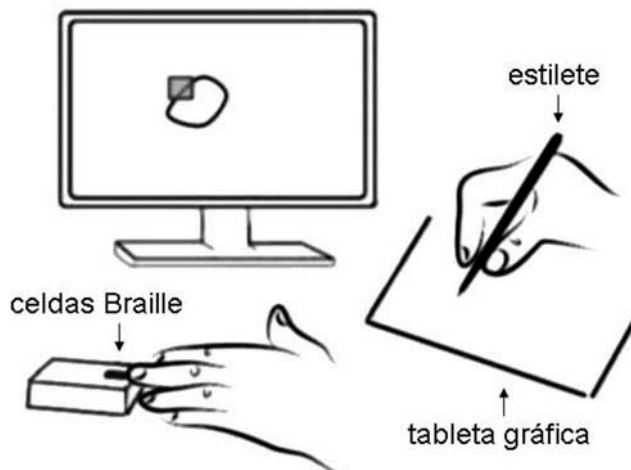


Figura 3. Representación del dispositivo TACTOS.

geométricas de complejidad creciente (Ammar, Gapenne, Blomme, & Rovira, 2005). Además, este DSS ofrece una gran ventaja heurística al permitir analizar los movimientos que realiza el participante con el estilete, i.e., trayectoria perceptual. Ello hace posible estudiar las reglas sensoriomotoras puestas en juego e identificar estrategias utilizadas (Ziat, Gapenne, Stewart, & Lenay, 2007).

Otro dispositivo es la Linterna Enactiva, diseñada por Froese y Spiers (2007) para guiar sin claves visuales, la locomoción del usuario. Consta de un sensor infrarrojo o de ultrasonidos que se sostiene en la mano, una unidad portable de operación y un estimulador táctil que se adhiere a la otra mano (Figura 4). La linterna provee información sobre distancia relativa entre el objeto y el usuario, según la siguiente regla: a mayor cercanía del objeto mayor intensidad de vibración y viceversa, a menor cercanía menor intensidad de estimulación. Froese, McGann, Bigge, Spiers, y Seth (2012) evaluaron a usuarios con visión normal en tareas de locomoción. La mayoría pudo orientarse y desplazarse sólo con la información que brinda el dispositivo, además varios de ellos experimentaron la atribución distal de los estímulos proximales. Este tipo de trabajo, destacan los autores, nutre a un debate muy actual sobre la relación entre percepción, movimiento y conciencia perceptual, esto es, el conocimiento que tiene la persona sobre su propia experiencia (el proyecto Open Source se encuentra en <http://enactivetorch.wordpress.com/enactive-torch-3-0-technical-details/>).

Bird, Marshall, y Rogers (2009) diseñaron prototipos inspirados en el TVSS para determinar las condiciones mínimas de estimulación vibrotáctil requeridas para guiar un comportamiento. En general los dispositivos constaban de una cámara portada en la cabeza, una PC y el estimulador vibrotáctil adherido al abdomen. Comprobaron que con sólo seis puntos de estimulación, los usuarios lograban realizar una tarea simple de seguimiento visual de una pelota y con 20 puntos, pudieron además atajarla cuando se acercaba lentamente hacia ellos. Particularmente, estas experiencias abonan la perspectiva filosófica de la '*mente extendida*' de Clark (2003), que postula que la mente no se localiza sólo en la cabeza y que la cognición surge de una combinación híbrida entre componentes biológicos y no biológicos. En este contexto el DSS se convierte en una extensión del usuario en tanto le permite experimentar el ambiente.

Un dispositivo particular para percibir desniveles en la superficie del suelo fue desarrollado por Díaz, Barrientos, Jacobs, y Travieso (2012); está compuesto por: un módulo de captura conformado por un sistema de cuatro cámaras que registran los

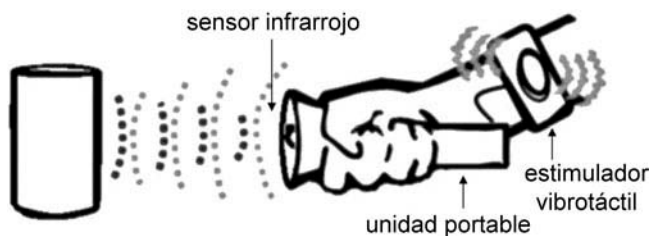


Figura 4. Representación del funcionamiento de la Linterna Enactiva. El estimulador vibrotáctil se activa cuando el sensor detecta la presencia de un objeto/obstáculo.

movimientos del participante y la superficie del suelo, una PC y 24 estimuladores vibrotáctiles alineados verticalmente sobre la espalda del usuario. Con suelo plano, el participante recibe un patrón uniforme de estimulación mientras que la presencia de desniveles u objetos ocasiona variaciones concomitantes en dicho patrón (Figura 5). Los autores realizaron una serie de experimentos con participantes con visión normal ocluida en una tarea de detección de presencia de objetos, con y sin control motor sobre la información de entrada (condición activa y pasiva, respectivamente). En la condición activa, el participante exploraba con desplazamientos y movimientos del eje corporal; en la condición pasiva el participante recibía los patrones de estimulación generados por participantes de la condición activa. Los participantes de la primera condición tuvieron un rendimiento significativamente superior que los de la segunda. Díaz et al. (2012) sugieren que podría estar operando en el dominio vibrotáctil, un mecanismo equivalente al de flujo óptico, definido como el patrón de movimiento aparente de objetos, bordes y superficies de una escena causado por el movimiento relativo entre el observador y la escena.

Bermejo, Ramos, y Arias (2009) utilizaron un DSS minimalista viso-auditivo que cuenta con un sensor de movimiento colocado sobre la cabeza del participante, un programa computacional diseñado para simular figuras geométricas invisibles (virtuales) en su plano frontal y auriculares como estimulador. Cada vez que el sensor contacta la figura, el dispositivo emite un zumbido específico que sólo se silencia cuando deja de contactarla (Figura 6). Los autores estudiaron

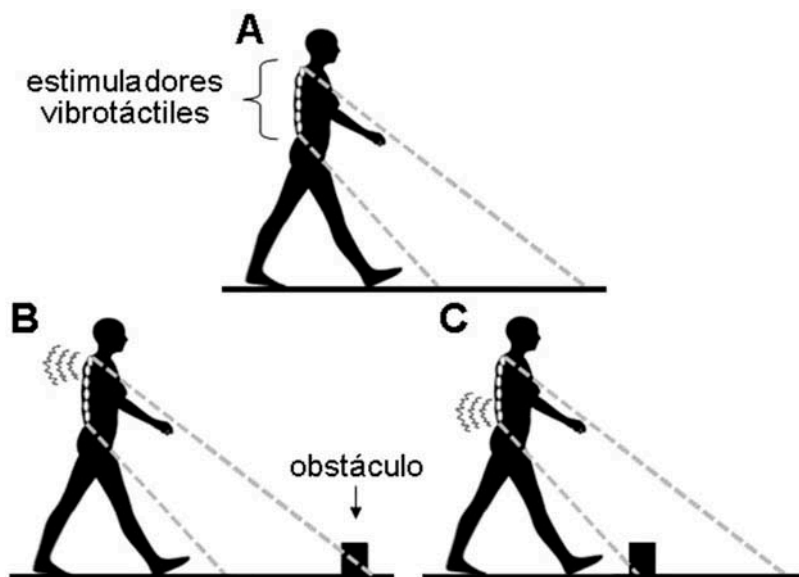


Figura 5. Representación esquemática del funcionamiento del dispositivo de Díaz et al. (2012) para percibir desniveles en la superficie del suelo. En (A) se observa al usuario en un suelo sin desniveles, por lo que los estimuladores mantienen un nivel de activación uniforme. En (B), dada la presencia de un desnivel (obstáculo) lejos del usuario, los estimuladores superiores se activan de manera diferenciada al resto. Y en C, debido a la presencia de un desnivel cerca del usuario, los estimuladores inferiores se activan de manera diferenciada al resto.

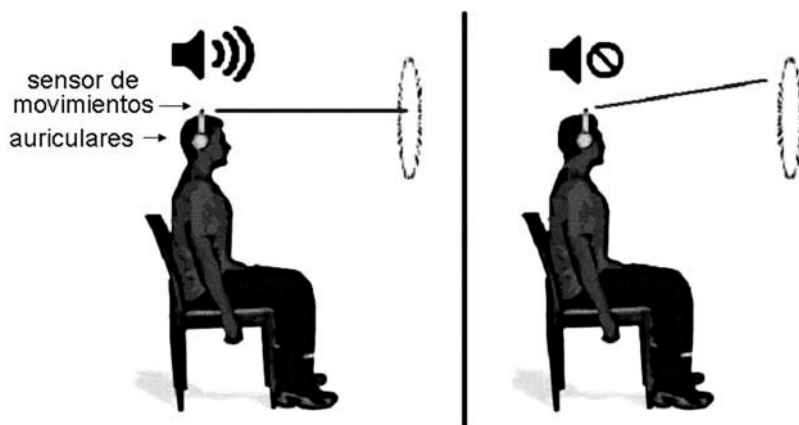


Figura 6. Representación del dispositivo minimalista viso-auditivo utilizado por Bermejo et al. (2009).

cómo personas ciegas y con visión normal, equipados con el dispositivo, exploraban el espacio moviendo libremente la cabeza para reconocer las figuras geométricas. Los resultados mostraron que ambos grupos lograron identificar las figuras geométricas invisibles sin recibir entrenamiento previo. En concordancia con Ziat et al. (2007), también describen estrategias sensoriomotoras que desarrollaron los participantes.

### **Contribuciones del fenómeno de SS en debates actuales en torno a la percepción**

En los últimos años trabajos surgidos desde diferentes disciplinas (neurofisiología, psicología, filosofía, entre otras) proponen una nueva manera de estudiar la percepción y fenómenos asociados. La generación de novedosa evidencia está poniendo en cuestión conocimientos tradicionalmente sostenidos sobre modalidades perceptuales, organización funcional de la corteza cerebral y conciencia perceptual, entre otros temas.

Tradicionalmente se consideró que a cada experiencia perceptual le correspondía una entrada sensorial específica y un concomitante correlato neuronal. Sin embargo, nuevas propuestas sugieren que para explicar cualquier cambio en la experiencia deben considerarse además, los patrones dinámicos de interdependencia dados entre la estimulación sensorial y la actividad corporizada (Hurley & Noë, 2003). En otras palabras, las respuestas neuronales no co-varían con los estímulos externos linealmente sino que estarían determinadas por dinámicas sensoriomotoras que intervienen en la conciencia perceptual. Estas dinámicas abarcan la mente, el cuerpo y el entorno, por lo que a través de un abordaje sensoriomotor se busca un nivel explicativo unificado capaz de atravesar los componentes involucrados (O'Regan & Noë, 2001; Venturelli, 2011). En esta dirección, los estudios que utilizan DSS constituyen una importante plataforma

para el estudio empírico de la conciencia perceptual, ya que ponen en evidencia que la actividad de un órgano sensorial específico y su asociación con determinadas áreas cerebrales no son condiciones suficientes para explicar la experiencia que tiene una persona (Fingerhut, 2009).

Varias preguntas giran en torno a la naturaleza de la percepción sustituida, los procesos involucrados y la vivencia cualitativa asociada en la SS. Por ejemplo, el cerebro ¿procesa los estímulos táctiles o auditivos como tales o los (re)convierte y procesa como estímulos visuales?, es decir, la naturaleza de la percepción sustituida ¿está determinada por la modalidad que sustituye o por la modalidad sustituida?

Algunos investigadores sostienen que la percepción obtenida con un DSS viso-auditivo o viso-táctil se parece más a la modalidad sensorial que sustituye: la audición o el tacto (Block, 2003; Humphrey, 1992), mientras que otros sostienen que la percepción se experimenta según la modalidad sustituida: la visión (Hurley & Noe, 2003). Para examinar esta cuestión Ward y Meijer (2010) estudiaron la experiencia de personas con ceguera adquirida expertas en el uso del vOICe. Concluyeron que estos usuarios experimentan una detallada fenomenología visual desarrollada por el uso sostenido durante varios meses del DSS y que esta conciencia depende además, de la experiencia visual previa. Proulx (2010) sugiere que se necesita un aprendizaje sensoriomotor muy preciso para desarrollar tal maestría multimodal.

Habitualmente se considera que es el órgano sensorial involucrado en el acto perceptivo el que determina la modalidad perceptual; en el caso de la SS viso-auditiva o viso-táctil serían los oídos o la piel, esto es, la modalidad que sustituye. Sin embargo, de acuerdo a los enfoques sensoriomotores, la información sensorial se genera a partir del modo en que se interactúa con el ambiente. Por ejemplo, una ley de interacción sensoriomotora simple en el dominio visual sería: ‘cuando me acerco a un objeto, su imagen aumenta de tamaño; cuando me alejo, su imagen disminuye’. Si las prestaciones de un DSS contemplan la posibilidad de establecer leyes semejantes, el usuario podría obtener la misma información en el dominio de la audición o del tacto, lo cual indicaría que estas reglas son amodales, tal como lo proponen Díaz et al. (2012). Así, cualquier intento por comprender las formas de percibir debe tener en cuenta la tendencia adaptativa del perceptor en su relación con el ambiente. En otras palabras, una forma estable de percibir se estructura no sólo por la sensibilidad biológica del agente sino que también abarca su meta y el conjunto de habilidades o experticia desarrollada en un determinado tiempo (McGann, 2010).

A su vez, Auvray y Myin (2009) argumentaron que la percepción obtenida con un DSS no es un fenómeno equivalente o reductible a la percepción habitual. Por el contrario, estos dispositivos son instrumentos que extienden la capacidad de percibir de una manera completamente nueva. En la misma dirección, se ha postulado que la experiencia lograda a través de un DSS debe ser considerada como una experiencia extendida diferente a cualquier experiencia anterior (Kiverstein & Farina, 2012).

Por su parte, los resultados de las investigaciones neurofisiológicas tienen importantes alcances e implicancias en esta discusión. En los últimos tiempos han surgido nuevas posturas en las neurociencias que también replantean las nociones clásicas de modalidad sensorial y su localización cerebral. Una línea de investigación precursora en estas perspectivas es la de Amedi y colaboradores, quienes ya en 2002 revelaron que un área específica de la corteza occipital puede ser activada por el reconocimiento visual o táctil de objetos 3D, la llamaron región viso-táctil látero-occipital (VTLO) (Amedi et al., 2002). En 2007, estudiaron la activación de la región VTLO cuando la persona utilizaba un DSS viso-auditivo. Llevaron a cabo un experimento con participantes entrenados en el uso del vOICE (siete personas con visión normal y dos personas ciegas) y no entrenados (siete personas con visión normal), a estos últimos se les había enseñado a asociar, de manera arbitraria, ciertos sonidos del vOICE con determinadas formas. Todos los participantes escucharon sonidos del vOICE mientras se les registró la actividad cortical con la técnica de Resonancia Magnética Funcional. Los resultados revelaron que el área estudiada se activó sólo en las personas entrenadas, es decir, sólo ellas fueron capaces de extraer de los sonidos, la información sobre la forma de objetos 3D (Amedi et al., 2007). Dos años después, Merabet, Battelli, Obretenovaa, Maguirea, Meijer, y Pascual-Leone (2009) aplicaron la técnica de la estimulación magnética transcraneal repetitiva (EMTr) en la región VTLO de una persona con ceguera adquirida altamente entrenada en el uso del vOICE, para conocer su efecto en la capacidad de reconocer formas. Su rendimiento fue considerablemente afectado, esto es, la EMTr tuvo un efecto disruptivo en su probada habilidad para reconocer formas. En concordancia, durante la estimulación, el participante experimentó una sensación de oscurecimiento y mencionó que la tarea le resultó difícil: debía escuchar cuidadosamente los sonidos para descubrir pistas útiles, en lugar de simplemente ‘ver los objetos’ como lo hacía habitualmente.

Los autores de estos últimos estudios neurofisiológicos concuerdan al afirmar que independientemente del tipo de información sensorial de entrada, la región estudiada se activa ante tareas de reconocimiento de formas. Los resultados apuntan a favor de una teoría metamodal del cerebro (Pascual-Leone & Hamilton, 2001) que postula que el principio organizador de las regiones cerebrales estaría más ligado a los requerimientos de tareas — por ejemplo, localización y reconocimiento de objetos — que a la información de entrada u órgano sensorial involucrado. Sostener esta hipótesis implica rechazar ideas fuertemente arraigadas en la neurofisiología. En esta dirección, los debates en el área de la SS deben modificarse: por un lado, pierde sentido la discusión sobre la naturaleza de la percepción sustituida dado que se desvanecen las posibilidades de procesamiento (uni)modal y/o de algún proceso especial de recodificación de la información. Por otro lado, ganan fuerza posiciones que consideran a la meta del acto perceptivo y a las habilidades involucradas como factores determinantes de la forma perceptiva utilizada (e.g., Auvray & Myin, 2009; McGann, 2010)

Dos corolarios se desprenden de estas nuevas consideraciones: (1) es imprescindible que la tarea sea relevante y necesaria para el desempeño cotidiano

(reconocer objetos, por ejemplo) para que el usuario logre apropiarse del DSS; (2) la visión, la audición y el tacto conforman un sólo sistema de percepción espacial que funciona con información redundante. Este hecho explicaría el interjuego dinámico entre modalidades que ocurre en situaciones reales y cotidianas y fenómenos particulares como la SS y la sinestesia. Consecuentemente pierde vigencia el propio concepto de información que alude a procesos de recepción, transmisión y codificación de datos. En las nuevas perspectivas teóricas, la información adquiere valor de tal en tanto la relación dinámica entre la persona y su entorno sea funcional y tenga significación ecológica. Además, adquiere evidencia el carácter multimodal de la información que proveen los objetos y eventos de la vida cotidiana.

### **Consideraciones finales**

Se presentó una revisión no exhaustiva de investigaciones relevantes sobre SS que pone sobre relieve la excelente posibilidad que brinda este fenómeno como recurso experimental para estudiar la percepción. La originalidad y calidad de la información resultante no puede lograrse con otro tipo de estrategias metodológicas. En esta dirección Lenay, Gapenne, Hanneton, Marque, y Geouelle (2003) mencionan que la SS ofrece una oportunidad única para estudiar la génesis de un percepto y los procesos sensorio-motores y cognitivos involucrados ya que personas con y sin discapacidad equipadas por primera vez con un DSS, se convierten en participantes nóveles en una nueva modalidad perceptual.

La creciente incorporación de DSS en estudios recientes está permitiendo contrastar revolucionarias hipótesis sobre mecanismos neurofisiológicos y cognitivos involucrados en la percepción. Se advierte una transición desde considerar a la SS como objeto de estudio a tratarla además, como un paradigma metodológico o una estrategia experimental.

Desde la neurofisiología, el fenómeno de la SS ofrece una llave para comprender bases estructurales y funcionales de fenómenos multimodales. A la luz de estas investigaciones se han postulados nuevas ideas sobre la organización funcional de la corteza sensorial que desafían nociones clásicas de áreas cerebrales.

La evidencia comportamental, a su vez, ofrece un particular soporte empírico al desarrollo de nuevas teorías enmarcadas bajo el amplio término de ciencias cognitivas corporizadas. Los trabajos en SS ponen en evidencia precisamente, la unidad indisoluble que conforman el individuo y su entorno al considerar el ineludible rol que tienen los movimientos exploratorios en la percepción en situaciones reales. Estos estudios nutren, además, discusiones sobre las potencialidades cognitivas que surgen de la interacción entre la mente y las máquinas, como plantea Clark en su tesis de la mente extendida: los usuarios de DSS se revelan como plataformas corporales en constante negociación y re-negociación entre los sentidos, las experiencias y razonamientos, que buscan permanentemente oportunidades para aprovechar al máximo las propiedades dinámicas del cuerpo y el mundo (Clark, 2008).

Particularmente los DSS minimalistas circunscriben al usuario a un nuevo espacio perceptual que emerge a medida que son utilizados. Hacen evidente que para que la percepción exista es necesaria la síntesis de una sucesión temporal de acciones y sensaciones en forma de leyes de covariación entre movimientos y estimulación (Auvray et al., 2007; Lenay & Steiner, 2010). En este sentido, los dispositivos minimalistas generan un escenario especialmente apto y simplificado para estudiar la estructuración del espacio perceptual a partir del establecimiento de las mencionadas leyes sensoriomotoras.

### Acknowledgements / Agradecimientos

This work is part of the UNC, Department of Science and Technology (SeCyT) PID project No. 162/2012; and the UTN, SeCyT PID project No. 1409. / *Este trabajo forma parte del proyecto PID N° 162/2012 de la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SeCyT) de la UNC; y del proyecto PID N° 1409 de la SeCyT de la UTN.*

### Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s) / *Los autores no han referido ningún potencial conflicto de interés en relación con este artículo.*

### References / Referencias

- Amedi, A., Jacobson, G., Hendler, T., Malach, R. & Zohary, E. (2002) Convergence of visual and tactile shape processing in the human lateral occipital complex. *Cerebral Cortex*, 12, 1202–1212. doi: [10.1093/cercor/12.11.1202](https://doi.org/10.1093/cercor/12.11.1202)
- Amedi, A., Kriegstein, K., Atteveldt, N. M., Beauchamp, M. S., & Naumer, M. J. (2005). Functional imaging of human crossmodal identification and object recognition. *Experimental Brain Research*, 166, 559–571. doi:[10.1007/s00221-005-2396-5](https://doi.org/10.1007/s00221-005-2396-5)
- Amedi, A., Stern, W. M., Camprodon, J. A., Bermpohl, F., Merabet, L., Rotman, S. . . . Pascual-Leone, A. (2007). Shape conveyed by visual-to-auditory sensory substitution activates the lateral occipital complex. *Nature Neuroscience*, 10, 687–689. doi:[10.1038/mn1912](https://doi.org/10.1038/mn1912)
- Ammar, A. A., Gapenne, O., Blomme, E., & Rovira, K. (2005). Analyse de l’exploration tactile sur support traditionnel chez la personne aveugle et conception de l’interface de lecture Tactos. *Revue d’intelligence artificielle*, 19, 339–354. doi:[10.3166/ria.19.339-354](https://doi.org/10.3166/ria.19.339-354)
- Auvray, M., & Myin, E. (2009). Perception with compensatory devices: From sensory substitution to sensorimotor extension. *Cognitive Science*, 33, 1036–1058. doi:[10.1111/j.1551-6709.2009.01040.x](https://doi.org/10.1111/j.1551-6709.2009.01040.x)
- Auvray, M., Philippona, D., O’Regan, J. K., & Spence, C. (2007). The perception of space and form recognition in a simulated environment: The case of minimalist sensory-substitution devices. *Perception*, 36, 1736–1751. doi:[10.1068/p5800](https://doi.org/10.1068/p5800)
- Bach-y-Rita, P. (1967). Sensory plasticity. *Acta Neurologica Scandinavica*, 43, 417–426. doi:[10.1111/j.1600-0404.1967.tb05747.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0404.1967.tb05747.x)
- Bach-y-Rita, P. (1972). *Brain mechanisms in sensory substitution*. New York, NY: Academic Press.
- Bach-y-Rita, P., Collins, C. C., Saunders, F. A., White, B., & Scadden, L. (1969). Vision substitution by tactile image projection. *Nature*, 221, 963–964. doi:[10.1038/221963a0](https://doi.org/10.1038/221963a0)
- Bach-y-Rita, P., & Kercel, S. W. (2003). Sensory substitution and the human-machine interface. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 541–546. doi:[10.1016/j.tics.2003.10.013](https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.10.013)



- Bermejo, F., Ramos, O., & Arias, C. (2009). Descubriendo figuras geométricas invisibles: una experiencia en sustitución sensorial. XII Reunión Nacional y I Encuentro Internacional de la Asociación Argentina de Ciencias del Comportamiento. Buenos Aires, Argentina, 25–27 August.
- Bird, J., Marshall, P., & Rogers, Y. (2009). Low-fi skin vision: A case study in rapid prototyping a sensory substitution system. *Proceedings of HCI*, 55–64.
- Block, N. (2003). Tactile sensation via spatial perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 285–286. doi:10.1016/S1364-6613(03)00132-3
- Burton, H. (2003). Visual cortex activity in early and late blind people. *Journal of Neuroscience*, 23(10), 4005–4011.
- Clark, A. (2003). *Natural-born cyborgs: Minds technologies, and the future of human intelligence*. New York, NY: Oxford University Press.
- Clark, A. (2008). *Supersizing the mind: Embodiment, action, and cognitive extension*. Oxford: Oxford University Press.
- Collins, C. C. (1985). On mobility aids for the blind. In D. H. Warren, & E. R. Strelow (Eds.), *Electronic spatial sensing for the blind* (pp. 35–64). Boston: Martinus Nijhoff.
- Díaz, A., Barrientos, A., Jacobs, D. M., & Travieso, D. (2012). Action-contingent vibrotactile flow facilitates the detection of ground level obstacles with a partly virtual sensory substitution device. *Human Movement Science*, 31, 1571–1584. doi:10.1016/j.humov.2012.05.006
- Fingerhut, J. (2009) The Explanatory Value of the Active Body for Perceptual Consciousness (Position Paper) Key Issues in Sensory Augmentation. Workshop, University of Sussex, Brighton, 26–27 March.
- Froese, T., McGann, M., Bigge, W., Spiers, A., & Seth, A. K. (2012). The enactive torch: A new tool for the science of perception. *IEEE Transactions on Haptics*, 5, 365–375. doi:10.1109/TOH.2011.57
- Froese, T., & Spiers, A. (2007). Toward a phenomenological pragmatics of enactive perception. *Enactive/07: Proceedings of the Fourth International Conference on Enactive Interfaces*, Grenoble, France: Association ACROE, 105–108
- Humphrey, N. (1992). *A history of the mind*. London: Chatto and Windus.
- Hurley, S., & Noë, A. (2003). Neural plasticity and consciousness. *Biology and Philosophy*, 18, 131–168. doi:10.1023/A:1023308401356
- Kim, J.-K., & Zatorre, R. J. (2008). Generalized learning of visual-to-auditory substitution in sighted individuals. *Brain Research*, 1242, 263–275. doi:10.1016/j.brainres.2008.06.038
- Kiverstein, J., & Farina, M. (2012). Do sensory substitution devices extend the conscious mind? In F. Paglieri (Ed.), *Consciousness in interaction: The role of the natural and social context in shaping consciousness* (pp. 19–40). Amsterdam: John Benjamins.
- Lenay, C., Canu, S., & Villon, P. (1997). Technology and perception: The contribution of sensory substitution systems. In Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Cognitive Technology, Aizu-Wakamatsu, Japan, 44–53.
- Lenay, C., Gapenne, O., Hanneton, S., Marque, C., & Geouelle, C. (2003). Sensory Substitution: Limits and perspectives. *Touching for Knowing, Cognitive Psychology of Haptic Manual Perception*, 275–292. doi:10.1075/aicr.53.22len
- Lenay, C., & Steiner, P. (2010). Beyond the internalism/externalism debate: The constitution of the space of perception. *Consciousness and Cognition*, 19, 938–952. doi:10.1016/j.concog.2010.06.011
- Loomis, J. M., Klatzky, R. L., & Giudice, N. (2012). Sensory substitution of vision: Importance of perceptual and cognitive processing. In R. Manduchi, & S. Kurniawan (Eds.), *Assistive technology for blindness and low vision* (pp. 162–191). Boca Raton, FL: CRC Press.
- McGann, M. (2010). Perceptual modalities: Modes of presentation or modes of interaction? *Journal of Consciousness Studies*, 17(1–2), 72–94.

- Meijer, P. B. L. (1992). An experimental system for auditory image representations. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 39, 112–121. doi:10.1109/10.121642
- Merabet, L. B., Battelli, L., Obretenova, S., Maguire, S., Meijer, P., & Pascual-Leone, A. (2009). Functional recruitment of visual cortex for sound encoded object identification in the blind. *Neuroreport*, 20, 132–138. doi:10.1097/WNR.0b013e32832104dc
- Merabet, L. B., Rizzo, J. F., Amedi, A., Somers, D. C., & Pascual-Leone, A. (2005). What blindness can tell us about seeing again: Merging neuroplasticity and neuroprostheses. *Nature Reviews. Neuroscience*, 6, 71–77. doi:10.1038/nrn1586
- O'Regan, J. K., & Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *The Behavioral and Brain Sciences*, 24, 939–973. doi:10.1017/S0140525X01000115
- Pascual-Leone, A., & Hamilton, R. (2001). The metamodal organization of the brain. *Progress in Brain Research*, 134, 427–445. doi:10.1016/S0079-6123(01)34028-1
- Proulx, M. J. (2010). Synthetic synaesthesia and sensory substitution. *Consciousness and Cognition*, 19, 501–503. doi:10.1016/j.concog.2009.12.005
- Ptito, M., Moesgaard, S. M., Gjedde, A., & Kupers, R. (2005). Cross-modal plasticity revealed by electrotactile stimulation of the tongue in the congenitally blind. *Brain: A Journal of Neurology*, 128, 606–614. doi:10.1093/brain/awh380
- Rauschecker, J. P. (1995). Compensatory plasticity and sensory substitution in the cerebral cortex. *Trends in Neurosciences*, 18, 36–43. doi:10.1016/0166-2236(95)93948-W
- Renier, L., Bruyer, R., & De Volder, A. G. (2006). Vertical-horizontal illusion present for sighted but not early blind humans using auditory substitution of vision. *Perception & Psychophysics*, 68, 535–542. doi:10.3758/BF03208756
- Renier, L., Collignon, O., Poirier, C., Tranduy, D., Vanlierde, A., Bol, A. . . De Volder, A. G. (2005). Cross-modal activation of visual cortex during depth perception using auditory substitution of vision. *NeuroImage*, 26, 573–580. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.01.047
- Renier, L., Laloyaux, C., Collignon, O., Tranduy, D., Vanlierde, A., Bruyer, R., & De Volder, A. G. (2005). The Ponzo illusion with auditory substitution of vision in sighted and early-blind subjects. *Perception*, 34, 857–867. doi:10.1068/p5219
- Siegle, J., & Warren, W. (2010). Distal attribution and distance perception in sensory substitution. *Perception*, 39, 208–223. doi:10.1068/p6366
- Sur, M., Garraghty, P. E., & Roe, A. W. (1988). Experimentally induced visual projections into auditory thalamus and cortex. *Science*, 242, 1437–1441. doi:10.1126/science.2462279
- Venturelli, N. (2011). Expandiendo el espacio de búsqueda para una ciencia de la conciencia perceptual. *Revista Argentina de Ciencias del Comportamiento*, 3(2), 29–43.
- Ward, J., & Meijer, P. (2010). Visual experiences in the blind induced by an auditory sensory substitution device. *Consciousness and Cognition*, 19, 492–500. doi:10.1016/j.concog.2009.10.006
- Ziat, M., Gapenne, O., Stewart, J., & Lenay, C. (2007). Haptic recognition of shapes at different scales: A comparison of two methods of interaction. *Interacting with Computers*, 19, 121–132. doi:10.1016/j.intcom.2006.07.004